

SÉRIE A, N° 1110

N° D'ORDRE :

1960

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

Libre
LE ~~GRADE~~ D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

CHRISTIAN COUPARD

Ingenieur des Arts et Manufactures

1^{re} THÈSE. — INFLUENCE DU VENT SUR LES BATIMENTS

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

soutenues le 13 juillet 1927 devant la Commission d'examen

MM. CH. MAURAIN. . . . *Président*

MARCHIS. . . . }
TOUSSAINT. . . } *Examineurs*

PARIS

IMPRIMERIE DU PALAIS

20, RUE GEOFFROY-L'ASNIER, 20

1927

SÉRIE A, N° 1110

N° D'ORDRE :

1960

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

Coupard
LE GRADE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

CHRISTIAN COUPARD

Ingénieur des Arts et Manufactures

1^{re} THÈSE. — INFLUENCE DU VENT SUR LES BATIMENTS

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

soutenues le 13 juillet 1927 devant la Commission d'examen

MM. CH. MAURAIN. . . . *Président*

MARCHIS. . . . }
TOUSSAINT. . . } *Examineurs*

PARIS

IMPRIMERIE DU PALAIS

20, RUE GEOFFROY-L'ASNIER, 20

1927

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen.
Doyens honoraires

C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.
P. APPELL, M. MOLLIARD.

Professeurs honoraires.

P. PUISEUX.
V. BOUSSINESQ.
A. JOANNIS.
H. LE CHATELIER.
H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
A. LEDUC.
G. SAGNAC.

Professeurs

EMILE PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
G. KÖNIGS Mécanique physique et expérimentale.
E. GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
P. JANET Electrotechnique générale.
F. WALLERANT .. Minéralogie.
H. ANDOYER Astronomie.
P. PAINLEVÉ Mécanique analytique et mécanique céleste.
E. HAUG Géologie.
Gabriel BERTRAND Chimie biologique.
M^{me} P. CURIE.... Physique générale et radioactivité.
M. CAULLERY Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ Chimie appliquée.
G. URBAIN Chimie minérale.
Émile BOREL Calcul des probabilités et Physique mathémat.
L. MARCHIS Aviation.
Jean PERRIN Chimie physique.
Rémy PERRIER .. Zoologie (Enseignement P. C. N.).
H. ABRAHAM Physique.
M. MOLLIARD Physiologie végétale.
E. CARTAN Géométrie supérieure.
L. LAPICQUE Physiologie générale.
E. VESSIOT Théorie des groupes et calcul des variations.
A. COTTON Physique générale.
J. DRACH Application de l'analyse à la géométrie.
Charles FABRY .. Physique.
Charles PÉREZ .. Zoologie.
Léon BERTRAND .. Géologie appliquée et géologie régionale.
R. LESPIEAU Théories chimiques.
E. RABAUD Biologie expérimentale.
P. PORTIER Physiologie comparée.
E. BLAISE Chimie organique.
P.-A. DANGEARD .. Botanique.
P. MONTEL Mécanique rationnelle.
P. WINTREBERT .. Anatomie et histologie comparées.
O. DUBOSCQ Biologie maritime.
G. JULIA Mathématiques générales.
A. JOB Chimie générale.
A. MAILHE Etude des combustibles.
L. LUTAUD Géographie physique.
Eugène BLOCH .. Physique théorique et physique céleste.
N Mécanique des fluides et applications.

E. HÉROUARD Zoologie.
E. PÉCHARD .. Chimie (Enseign. (P.C.N.))
V. AUGER Chimie analytique.
M. GUICHARD Chimie minérale.
A. GUILLET Physique.
C. MAUGUIN Minéralogie.
L. BLARINGHEM Botanique.
A. MICHEL-LÉVY .. Pétrographie.
A. DEREIMS Géologie.
R. DONGIER Physique du globe.
A. DENOY Calcul diff. et intégral.
H. BÉNARD Physique (P.C.N.).

E. DARMOIS Physique.
G. BRUHAT Physique.
H. MOUTON Chimie physique.
L. JOLEAUD Paléontologie.
M. JAVILLIER Chimie biologique.
A. DUFOUR Physique (P.C.N.).
F. PICARD Zoologie (Evolution des êtres organisés).
ROBERT-LÉVY Zoologie.
L. DUNOYER Optique appliquée.
A. GUILLIERMOND .. Botanique (P.C.N.).
A. DEBIERNE Radioactivité.

Secrétaire DANIEL TOMBECK.



A MONSIEUR LE PROFESSEUR A. TOUSSAINT

Hommage respectueux.



A MA MERE

En témoignage de profonde et reconnaissante affection.

AVANT-PROPOS

Les études que j'ai pu faire au laboratoire aérodynamique de Saint-Cyr et qui sont l'objet de ce travail m'ont permis de vérifier un certain nombre de phénomènes observés sur des toitures pendant des tempêtes et des ouragans. Je pense qu'elles pourront servir à une connaissance plus approfondie des efforts en jeu dans les constructions soumises au vent.

Je remercie d'abord M. Maurain, doyen de la Faculté des sciences, pour la bienveillante attention qu'il a bien voulu me prêter.

Je suis profondément reconnaissant à M. Marchis pour les conseils éclairés qu'il m'a prodigués et l'aide si précieuse accordée pour l'impression de ce travail.

Je dois aussi de très particuliers remerciements à M. Toussaint qui fut mon directeur, et non seulement guida mes recherches, mais réalisa pratiquement les modèles d'expérience.

Au Service technique de l'Aéronautique qui m'autorisa à poursuivre ces expériences au laboratoire aérodynamique de Saint-Cyr, j'adresse également un sincère merci.

Enfin, je n'aurais garde d'oublier M. le Président de la Chambre syndicale des Industries aéronautiques de l'aide qu'il a bien voulu m'apporter pour l'impression de ce travail.

Influence du vent sur les bâtiments

CHAPITRE PREMIER

Généralités

La formule généralement employée pour exprimer la pression de l'air est :

$$P = Z \frac{d}{g} S V^2$$

dans laquelle nous avons utilisé les notations suivantes :

d = poids de l'unité de volume d'air ;

g = accélération de la pesanteur ;

V = la vitesse du courant d'air ;

S = la surface exposée au vent ;

Z = coefficient numérique, nombre abstrait, ne dépendant que de la forme et de l'orientation du corps.

L'expérience a montré que pour un même corps, Z est indépendant de la nature du fluide ainsi que de l'unité employée.

En France on pose $K = Z \frac{d}{g}$

et la formule devient .

$$P = K S V^2$$

employant comme unité

le mètre, le kilo et la seconde.

Il serait également utile de rappeler la loi de BERNOULLI, ainsi énoncée :

Dans un fluide parfait en mouvement horizontal permanent, la somme de la force vive (énergie cinétique) et de la pression (énergie potentielle) est constante, pourvu que la variation de la pression soit faible.

L'accroissement de la force vive est égal à la diminution correspondante de la pression

$$p + \frac{\delta V^2}{2g} = \text{const.}$$

p , étant pour un point du circuit, la différence entre la pression de l'air et la pression atmosphérique ;

V , la vitesse et δ le poids spécifique de l'air à 15° et 760 m/m.

Nous reprendrons certaines observations mentionnées par M. EIFFEL au début de son étude sur les bâtiments.

Il est peu exact de dire que, la pression exercée par le vent sur une surface,

résulte de la perte de force vive de l'air qui rencontre cet obstacle. S'il en était ainsi, on ne s'expliquerait pas les dépressions ou succions qui se produisent.

L'effort du vent sur une paroi n'a rien de comparable au choc d'un solide, seule la pression des filets d'air au voisinage des surfaces est à considérer.

Au-dessus d'un obstacle A — B — C — D (fig. 1), la vitesse du vent doit augmenter, puisque la perturbation produite, s'étendant à une distance limitée, au-dessus de B — C, il y a étranglement par rapport aux couches non influencées, et le débit doit être plus grand dans cette région qu'au-devant de l'obstacle.

La vitesse augmentant, la pression diminue dans les parties supérieures ou latérales d'un obstacle ; il y a donc succion. En arrivant sur l'obstacle, les filets d'air s'infléchissent et se ralentissent, il y a donc surpression.

De C en E la pression augmente progressivement, car les filets d'air passant sur B C conservent leurs directions en vertu de la vitesse acquise.

Dans la région C D E il y a remous, et sur C D la dépression sera de même ordre que sur C B.

Les pressions sont donc moins importantes que les succions et c'est la partie directement opposée au vent qui reçoit la moindre partie de son action.

L'impression ressentie par un homme près d'un obstacle, ne peut en aucune façon mesurer l'action reçue par celui-ci, car cette impression ne dépend que de la vitesse du fluide, tandis que l'action ne vaut que par la pression agissante. Derrière un obstacle on ne sent pas plus la dépression qu'on ne sentirait la baisse d'un baromètre.

Les éléments d'expérience consistent à rechercher la différence entre les pressions extérieures et les pressions intérieures qui devraient rester égales à la pression atmosphérique. Dans la pratique, le cas ne serait réalisable que pour un coup de vent instantané, et pour un bâtiment hermétiquement clos et sans variation de température.

Si le vent souffle sur un bâtiment ayant une seule ouverture, et qu'il y ait surpression ou dépression à l'extérieur, au voisinage de cette ouverture, l'air entre ou sort jusqu'à ce que l'équilibre soit réalisé entre l'intérieur et l'extérieur.

Cet équilibre est atteint très rapidement dans le cas d'une ouverture de moyenne importance, car il faut un cube d'air relativement faible pour faire varier la pression dans des limites correspondant à l'action du vent.

Si le bâtiment a plusieurs ouvertures, il y aura un équilibre à l'intérieur, fonction des pressions à chaque orifice ainsi que des dimensions de ceux-ci.

Pour faire des expériences sur des bâtiments existants, il ne faut pas que le vent souffle en rafales trop rapides, car une indétermination peut naître du fait qu'à travers des ouvertures même très petites, l'équilibre de pression tend constamment à s'établir. Il est donc très difficile tant que le vent n'est pas très calme, de faire des lectures barométriques exactes.

Si un bâtiment présente une grande ouverture soumise à l'action du vent, il sera rationnel de prendre comme pression à l'intérieur, la moyenne des pressions, agissant sur l'emplacement de l'ouverture, si le bâtiment était fermé. Ceci n'est vrai d'ailleurs que lorsque les dimensions du bâtiment sont suffisamment grandes, par rapport à celles de l'ouverture, afin que les effets dynamiques du vent n'entrent pas en jeu, car autrement, il faudrait étudier chaque cas d'ouverture pour connaître les pressions créées à l'intérieur par chaque filet d'air.

Nous noterons à ce sujet que M. EIFFEL admet dans des expériences dont nous reparlerons ultérieurement, que la présence d'un pignon ouvert ne modifie pas sensiblement l'écoulement d'air à l'extérieur.

Quant à la pression à l'intérieur du hangar, elle a été l'objet d'une étude de M. EIFFEL et les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de rapport bien défini avec le cas, où le pignon étant fermé, le vent vient le frapper.

CHAPITRE II

Travaux faits antérieurement

EIFFEL. — Parmi les travaux dont le but a été la recherche des efforts du vent sur les constructions, il convient de citer en premier lieu, le chapitre des « bâtiments » parus dans le livre *Recherches sur la résistance de l'air et l'aviation*, par EIFFEL (1914). Nous allons analyser succinctement le but proposé et les résultats obtenus.

EIFFEL a d'abord cherché à démontrer la similitude des efforts produits, par un courant d'air de vitesse donnée, sur des hangars de dimensions différentes.

Il s'est servi pour cette expérience de trois hangars :

Le premier de 340 m/m. de hauteur avec une longueur et une largeur de 400 m/m. ; les dimensions du deuxième étaient dans le rapport de $1/8^{\circ}$ avec celles du premier, et celles du troisième étaient avec celles du premier dans le rapport de $1/50^{\circ}$. Si les résultats d'expérience donnaient pour le premier et le troisième de ces hangars des résultats d'une concordance aussi grande que ceux qu'on peut attendre des mesures employées, on pourra imaginer que ces résultats seront encore applicables à un bâtiment dont les dimensions seraient cinquante fois plus grandes que celles du premier hangar envisagé. Or, les résultats trouvés donnaient assez de concordance pour que ce point puisse sembler acquis.

Il sera donc possible d'appliquer les résultats obtenus à un bâtiment de 17 mètres de hauteur ayant 20 mètres de longueur et de largeur. Un hangar de cette proportion est déjà de dimensions suffisantes pour penser que si les mesures trouvées dans une expérience lui sont applicables, d'autres données obtenues dans des conditions analogues permettront d'appliquer à des hangars de dimensions quelconques, des résultats d'études plus générales faites dans des laboratoires. Nous insistons particulièrement sur ce point, car cette condition de similitude est très intéressante pour l'étude que nous vous proposons.

La deuxième série d'expériences relatées par M. EIFFEL porte sur l'étude des efforts exercés par un courant d'air sur une réduction au $1/200^{\circ}$ d'un hangar type Belfort ayant les dimensions suivantes : longueur 100 mètres, largeur 30 mètres, hauteur 24 mètres. La vitesse du courant d'air y étant maintenue à 40 mètres à la seconde, c'est sensiblement la vitesse maximum du vent dans les plus fortes tempêtes.

Les expériences furent faites avec des modèles en bois verni, constituant des boîtes bien étanches, que l'on avait placés sur une large planche horizontale formant sol. L'intérieur étanche des modèles communiquait avec un manomètre dont l'autre branche était ouverte en air calme.

Pour faire les mesures, on débouchait successivement les ouvertures aux points où l'on désirait déterminer l'effort produit par le vent. On obtenait ainsi la pression ou la succion existant extérieurement à l'endroit considéré.

Les résultats trouvés furent les suivants :

- 1° Pression positive sur la paroi verticale directement frappée par le vent et sur le premier tiers du pan du toit adjacent ;
- 2° Partout ailleurs dépressions atteignant leur maximum vers le faîtage et parfois avant.

Cette dépression était due au relèvement brusque des filets d'air frappant le bâtiment.

Dans la section médiane d'un hangar quand le vent frappe une des parois, la pression est d'environ 80 kilos par mètre carré.

La toiture adjacente est d'abord soumise à des pressions, puis à des dépressions, pouvant atteindre 80 kilos par mètre carré. Les dépressions de l'autre pan de toiture et de l'autre paroi verticale sont de 40 à 50 kilos.

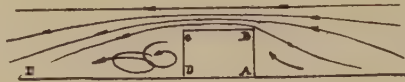


figure 1

En faisant tourner le hangar, les pressions diminuent et les dépressions augmentent d'abord. Puis, pressions et dépressions diminuent ensemble, les dernières continuant à être supérieures aux premières, celles-ci finissant par disparaître quand le vent est normal à un des pignons.

M. EIFFEL a encore étudié le cas de hangars ayant un lanterneau ouvert et il



figure 2



figure 3

a fait des expériences pour mesurer les efforts résultants avec les dispositifs suivants :

- 1° Un lanterneau ouvert et les pignons fermés ;
- 2° Un pignon ouvert avec un hangar sans lanterneau ;
- 3° Le lanterneau ouvert et un pignon ouvert.

Dans le premier cas, on fait les mesures, par la différence entre les pressions, dans une boîte placée directement sous le lanterneau (fig. 2), représentant la pression existant à l'intérieur du hangar, avec celle mesurée dans le hangar comme il a été établi précédemment.

On trouve alors que la pression maximum a lieu quand le vent frappe une des parois longitudinales ; elle peut atteindre 160 kilos par mètre carré sur la paroi directement frappée, et 100 kilos sur le pan de toiture adjacent.

Les dépressions produites à l'intérieur du hangar pour un vent de 40 mètres/secondes varient de 80 kilos pour le vent normal à la longueur, et diminuent jusqu'à 34 kilos quand le vent frappe un pignon.

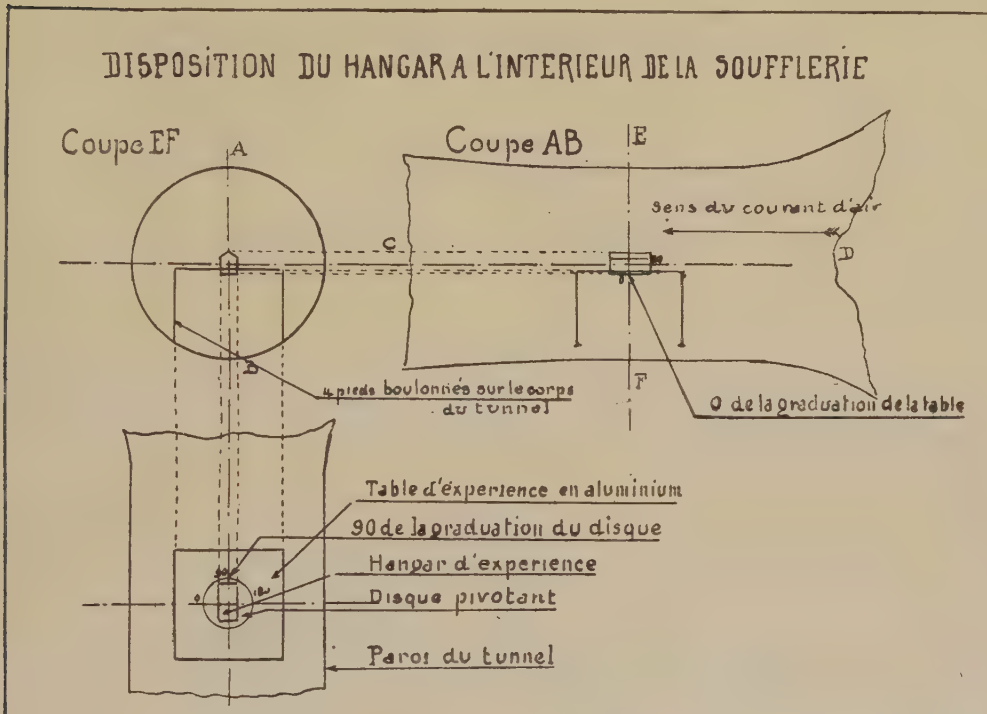
Dans le deuxième cas, M. EIFFEL admet que l'ouverture d'un pignon ne modifie pas sensiblement l'écoulement de l'air, il recherche uniquement la pression inté-

rieure, supposant que la pression extérieure reste semblable à celle des hangars fermés.

Avec un vent de 40 mètres/secondes, si α est l'angle de rotation du hangar, et si α est égal à 0 quand le vent s'engouffre dans le pignon ouvert, il a été trouvé les résultats suivants :

α	:	0	30	60	90	120	150	180
Pression en kilos	:	+ 85	+ 89	- 3	- 62	- 36	- 42	- 20

Pour 30°, les efforts résultants extérieurs et intérieurs agissant au faîtage don-



nant une succion d'environ 200 kilos par mètre carré. Nous remarquerons que les surcharges intérieures, trouvées dans le cas du pignon ouvert, correspondent sensiblement à la moyenne des surcharges supportées par un pignon, dans le cas du hangar fermé, et cela dans des conditions de force et de direction de vent correspondantes.

Troisième cas. — Ce cas est très complexe, car il existe alors un courant d'air et M. EIFFEL tout en cherchant la pression intérieure comme résultante des efforts en jeu aux différentes ouvertures, ne s'est guère arrêté à cette dernière étude, qui sort d'ailleurs de notre programme.

M. EIFFEL fait dans son exposé la remarque suivante, sur laquelle nous reviendrons plus tard.

La loi du sinus carré est maintenant reconnue inexacte, d'abord parce que cette loi qu'on appliquait aux plans minces, est dans ce cas considérée comme fausse, et, ensuite, parce qu'on ne peut appliquer aux formes usuelles des formules de plans minces ; l'écoulement de l'air dans ces deux cas étant entièrement différent.

Les types de hangar étudiés par M. EIFFEL sortent des types usuels ; cependant

les résultats trouvés sont très concordants avec ceux que nous avons obtenus aux cours d'expériences que nous exposerons ultérieurement.

Nous devons signaler encore certains auteurs dont les études ont porté sur les efforts dus au vent et qui ont parlé incidemment dans leurs ouvrages de l'action du vent sur les bâtiments.

Nous relaterons le chapitre IV du répertoire d'Aérodynamique expérimentale de M. TOUSSAINT, Directeur de l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr ; M. W. MARGOULIS, ancien Directeur du Laboratoire EIFFEL et M. R. PRIS, Ingénieur à l'Institut Aéronautique de Saint-Cyr, chapitre qui est consacré aux auteurs ayant touché éventuellement cette question :

1° page. — Experiments on The shielding effect of wind at the entrance to airship sheds (*R and M*, n° 105, 1913-1914).

Relation d'un essai en soufflerie, modèles d'un dirigeable et d'un écran protégeant le dirigeable contre le vent.

Mesure de la poussée du vent sur le dirigeable en fonction de la hauteur et de la position de l'écran ainsi qu'en fonction de l'angle du vent avec l'écran.

Cette étude traite principalement des efforts sur un dirigeable et ne dit rien de spécial pour l'étude des bâtiments.

2° Griffiths and Powel the screening effects of airship screens and docks (*R and M*, n° 252, 1916-1917).

Experiments on models of airship screens.

Cette étude n'a aussi en vue que les efforts résultants sur un dirigeable et abandonne complètement toute étude d'efforts sur les bâtiments.

3° Jones and Levy. — A study of the flow of air in the neighbourhood of an airship shed and screens and the forces and moments brought into play (*R and M*, n° 338, 1917-1918).

Mêmes observations que pour les études précédentes. Cet ouvrage n'a d'autre but que l'influence du vent sur les dirigeables ou l'influence résultante du vent sur ces appareils par l'interposition d'un hangar ou d'un écran.

Nous citerons encore, en suivant, la nomenclature de M. TOUSSAINT.

4° Woodford and Pell. — The variation in the wind above an airship shed due to the presence of the shed (*R and M*, n° 423, 1917-1918) ;

5° Naylor and Woodford. — Experiments on the most efficient form and distribution of wind screens for Bessoneau hangars (*R and M*, n° 428, 1917-1918) ;

6° Woodford and Pell. — Ring screens for aéroplanes (*R and M*, n° 424, 1917-1918) ;

7° R A F the airflow behind a screen for protecting an aéroplane in the open (*R and M*, n° 431, 1917-1918) ;

8° Costanzi. — Azione del vento sui franchi di un tipo di hangar (*Rendiconti*, 1912, n° 5) ;

9° Rinine N. — Essais sur les efforts de l'air subis par les bâtiments (en russe) *Bulletin de l'Institut des voies de communication*, Pétrograd, 1913) ;

10° Schlink W. — Über Wind verhältnisse hinter Luft schiffhallen mit Kreisrunder und rechteckiger Grundrissfläche (*J F u M*, nos 15-16, 1915).

Ces derniers ouvrages se rapportent à des bâtiments d'un genre très particulier ayant peu de rapports avec l'étude que nous nous proposons. Dans ceux-ci d'ailleurs la préoccupation des auteurs est surtout la protection des appareils d'aviation.

Nous devons encore signaler comme se rapportant à l'étude du vent sur les bâtiments, le rapport de M. TOUSSAINT, Directeur de l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr, sur l'action d'un courant d'air, agissant sur un cylindre dont les génératrices sont perpendiculaires au sens du vent.

Cette étude donne d'abord un résumé des différentes expériences exécutées anté-

rieurement et relate ensuite une série d'observations expérimentales très précieuses au sujet de la variation des efforts sur les parois d'un cylindre sous l'action de l'air.

Cette étude ne se rapporte qu'aux cylindres de faible diamètre ; mais les résultats pourraient vraisemblablement être étendus au calcul des cheminées d'usines et même à ceux des tours à très grand diamètre ; par exemple, les tours utilisées pour les réfrigérants.

Il est à remarquer, en effet, que la zone critique est rapidement atteinte quand le diamètre augmente, et qu'au-dessus de $V D = 3,5$ (V étant la vitesse en mètres/secondes et D le diamètre en mètres du cylindre), la courbe des valeurs de K reste sensiblement constante et variant entre 0,0200 et 0,0300. Ce résultat donnerait pour l'action du vent sur les tours des valeurs très nettement inférieures à celles employées habituellement, puisque avec ce coefficient on trouverait pour un vent de 40 mètres/secondes, un effort maximum de 50 kilos par mètre carré, alors qu'avec les données admises aujourd'hui, il faudrait prendre au minimum :

$$P = 0,56 \times 270 = 150 \text{ kilos.}$$

CHAPITRE III

Dispositif commun à toutes les expériences

Nous nous sommes servis pour la réalisation de nos expériences de la grande soufflerie du Laboratoire de Saint-Cyr. Nous n'insisterons pas sur la description déjà faite de cette soufflerie. (Thèse de M. TOUSSAINT, juillet 1924, *Bulletin S T A E*, n° 19.)

Dans cette étude de hangar, le sol était figuré par une grande tôle d'aluminium. Cette tôle, maintenue au bord par des cornières, était soutenue par quatre tubes en fer prenant appui sur les parois du tunnel de la soufflerie et boulonnés sur celle-ci.

Ces tubes boulonnés étaient ainsi très rigides et donnaient à la table une stabilité suffisante.

Le plan de cette table était situé légèrement au-dessous de l'axe du tunnel de la soufflerie, de façon que toutes les expériences sur les hangars placés au-dessus de cette table puissent se faire dans les meilleures conditions possibles.

Le sol ainsi constitué par cette tôle horizontale et rigide, il était utile de prévoir un dispositif pour permettre à un hangar placé au centre, de prendre toutes les directions possibles dans le sens du vent. Pour cela, on avait découpé au centre de la table, un disque d'environ 40 c/m. de diamètre. Le bord de l'orifice ainsi obtenu était renforcé sous la table par une garniture en bois A (schéma n° 3), cette garniture portait à l'intérieur un rebord B, d'un centimètre environ. Cette baguette était disposée pour supporter le disque en aluminium découpé dans la tôle. Ce disque était muni à sa circonférence d'une garniture en bois dur C, épousant exactement la forme circulaire de la pièce A de la table et la hauteur de cette dernière pièce était calculée de façon que le plan supérieur du disque coïncidât parfaitement avec le plan supérieur de la table, en prenant appui sur la baguette B.

Le disque, dans ces conditions, pouvait prendre toutes les positions possibles par rapport au courant d'air. Il suffisait, pour obtenir une stabilité complète, d'assurer une solidarité absolue du disque avec la table. Pour cela, à la pièce C étaient fixées deux pattes en bois D, disposées comme il est indiqué sur la figure 4. Ces pattes pouvant faire serrage sur la pièce A, assuraient une liaison parfaite entre la table et le disque et permettaient, puisqu'il n'y avait pas un frottement trop considérable, la rotation du disque tel qu'il était prévu.

Pour la commodité des opérations, et pour obtenir des lectures exactes, on avait tracé sur le disque et sur la table une graduation de 30 en 30°. Le 0 de la graduation de la table, qui était la graduation fixe, avait été choisi de façon que la ligne 0,180 soit parallèle à l'axe du tunnel de la soufflerie et que le 0 soit placé du côté de l'arrivée de l'air.

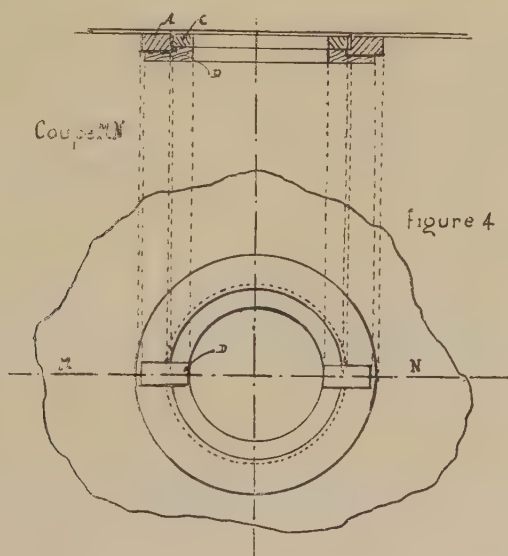
La table ainsi installée, il restait à chercher un dispositif qui permit de réaliser la fixation du petit hangar d'expérience sur le disque pivotant.

Une des expériences portant sur la recherche de l'influence de la hauteur des parois sur les efforts produits par le vent, il était utile de prévoir un orifice, de

façon à pouvoir y faire entrer le hangar et à le laisser dépasser de la hauteur nécessaire pour l'expérience à réaliser.

Un trou rectangulaire (fig. 5), de 0 m. 16 de largeur sur 0 m. 32 de longueur fut donc découpé dans la tôle du disque, de telle façon que le centre de gravité du rectangle coïncidât exactement avec le centre du disque. Il avait été prévu de même que la ligne 0,180 du disque serait parallèle au petit côté du rectangle. D'autre part, pour permettre la fixité du hangar, et en même temps donner toute rigidité à la tôle du disque, deux baguettes de bois dur avaient été prévues sous celle-ci et le long des deux grands côtés du rectangle.

Ces baguettes furent percées chacune de trois trous destinés au passage des vis de fixation soutenant le hangar dans les différentes positions à étudier.



L'observation des pressions ou des dépressions produites par un courant d'air sur le hangar d'expériences était obtenue comme il suit :

Au point à étudier, le hangar était percé d'un trou de 3 m/m. environ dans lequel était placé, à frottement dur, un petit tube de cuivre de 1 m/m. de diamètre intérieur.

La partie du tube à l'extérieur du hangar était affleurée de telle sorte que le plan de cette section coïncidât d'une façon absolue avec le plan de la région avoisinante du hangar.

La surface entre le tube et la partie avoisinante du hangar était bien rétablie au mastic. Cette précaution avait été prise de façon à éviter les remous ou tout écoulement d'air étranger à ceux existant normalement. A l'intérieur, le petit tube de cuivre dépassait d'environ 2 c/m., et était raccordé par un tube de caoutchouc au manomètre.

Les lectures étaient faites au moyen de micromanomètres (fig. 6), ceux-ci au nombre de 5, disposés parallèlement, sur une table, dans la chambre d'expériences et remplis d'alcool étaient réglés au début de chaque expérience. Cette disposition permettait de faire des lectures simultanées pour différents points du hangar.

Ces micromanomètres étaient chacun en communication, d'une part avec un petit tube de cuivre du hangar et, d'autre part, ouverts dans la chambre d'expérience où règne la pression statique du courant d'air.

Un manomètre, placé près de la table des micromanomètres, donnait la pression dans la chambre d'expériences.

Les micromanomètres étaient reliés aux petits tubes du hangar de la façon suivante :

Une planche étroite et longue d'environ 1 m. 50 portait un nombre variable de tubes en aluminium d'un diamètre intérieur de 4 m/m. environ. Ces tubes portaient à l'une de leurs extrémités des petits tubes de cuivre semblables à ceux du hangar et de l'autre côté, ils étaient rodés de façon à recevoir des tubes de caoutchouc.

Les tubes, une fois disposés sur la planchette, étaient passés à l'intérieur d'un tube en aluminium profilé (fig. 7), pour diminuer la résistance à l'air de la partie dans le tunnel et en même temps donner une plus grande rigidité à l'ensemble. On faisait alors pénétrer une extrémité de ce tube profilé dans le tunnel de la soufflerie, de façon que la partie des tubes d'aluminium garnie de tubes de cuivre, vienne déboucher immédiatement sous le hangar d'expériences et que l'autre extrémité arrive près de la table des micromanomètres.

Le hangar étant ouvert à sa partie inférieure, les petits tubes de cuivre y placés étaient reliés à ceux des tubes d'aluminium par des tubes de caoutchouc de faibles diamètres, l'autre extrémité des tubes d'aluminium étant reliée aux micromanomètres par d'autres tubes de caoutchouc.

Les tubes d'aluminium fixés sur la planchette étaient numérotés à chacune de leurs extrémités de façon qu'aucune erreur de lecture ne puisse être faite.

Dans les premières expériences, nous nous sommes servis de six tubes en aluminium sur la planchette et dans les dernières, nous en avons utilisé jusqu'à quatorze.

Les tubes de caoutchouc, reliant au hangar les tubes d'aluminium, une fois mis en place, il y avait dans la chambre d'expériences un excédent de tubes pouvant donner des observations. Une lecture simultanée ne pouvait donc être faite puisqu'il n'y avait que cinq micromanomètres et l'on ne pouvait que procéder successivement par échange de tubes.

D'autre part, un certain nombre de tubes du hangar étant reliés et prêts à donner des indications au micromanomètre, nous tâchions d'effectuer avec ces mêmes points le plus grand nombre de lectures possibles, de façon à ne pas avoir à faire la mise en place ou le changement des petits tubes de caoutchouc dans le hangar, ce qui était une opération longue et délicate.

C'est ainsi que certains tubes de cuivre du hangar étant reliés aux tubes d'aluminium, nous faisons toutes les lectures correspondant à la rotation du hangar.

Après chaque lecture, il n'y avait qu'à pénétrer dans le tunnel et à changer la direction.

Ce changement se faisait en très peu de temps étant donné le dispositif adopté.

Les micromanomètres pouvaient donner des indications de pression ou de succion suivant l'extrémité de l'appareil que nous attaquions avec l'un des tubes de caoutchouc.

Nous avons pu faire ainsi un très grand nombre de lectures sans perdre trop de temps aux changements de dispositions du hangar d'expériences.

CHAPITRE IV

Dispositif particulier à chaque expérience

Le hangar ayant servi pour les études générales sur l'influence de la direction et l'influence de la hauteur, était un hangar de 32 c/m de longueur sur 16 c/m de largeur, la hauteur des parois était de 34 c/m.

Quant à la toiture, nous avons adopté la pente de 50 % correspondant à un angle d'environ 26 degrés 30 minutes avec le plan horizontal. Les orifices prévus sur ce hangar étaient disposés comme suit (fig. 8) :

Toiture :

Partie médiane : 4 trous (A B C D)_M.

Partie en pignon : 4 trous (A B C D)_P.

Façade :

Partie en pignon : 6 trous (E F G H I K)_M.

Partie médiane : 6 trous (E F G H I K)_P.

Pignon :

Partie médiane : 5 trous (O Q R S T)_C.

Partie près façade : 3 trous (R S T)_B.

Ce hangar était fait de bois dur de 6 m/m d'épaisseur environ, bien raboté et poli sur toutes ses faces. Aucun fond n'avait été prévu de façon à permettre le passage par en dessous des tubes de caoutchouc.

Le hangar s'enfonçait, comme nous l'avons dit, à travers le disque pivotant de la table d'expériences, et était maintenu dans une position donnée par 3 vis de chaque côté, traversant préalablement les garnitures en bois des grands côtés du trou rectangulaire.

Nous avons prévu pour l'étude de l'influence de la hauteur les quatre hauteurs suivantes :

- 1° Hauteur : Hauteur de façade = 2 c/m ;
- 2° Hauteur : Hauteur de façade = 6 c/m ;
- 3° Hauteur : Hauteur de façade = 14 c/m ;
- 4° Hauteur : Hauteur de façade = 32 c/m ;

C'est la troisième hauteur, soit 14 c/m, qui nous a servi pour l'étude sur l'influence des directions.

Toute cote et disposition du hangar ont été indiquées sur le schéma 8 ci-joint.

Les hangars ayant servi à l'étude de l'influence de l'angle de la toiture avaient les dispositions communes ci-dessous :

Hauteur de façade : 10 c/m ; longueur de façade : 50 c/m.

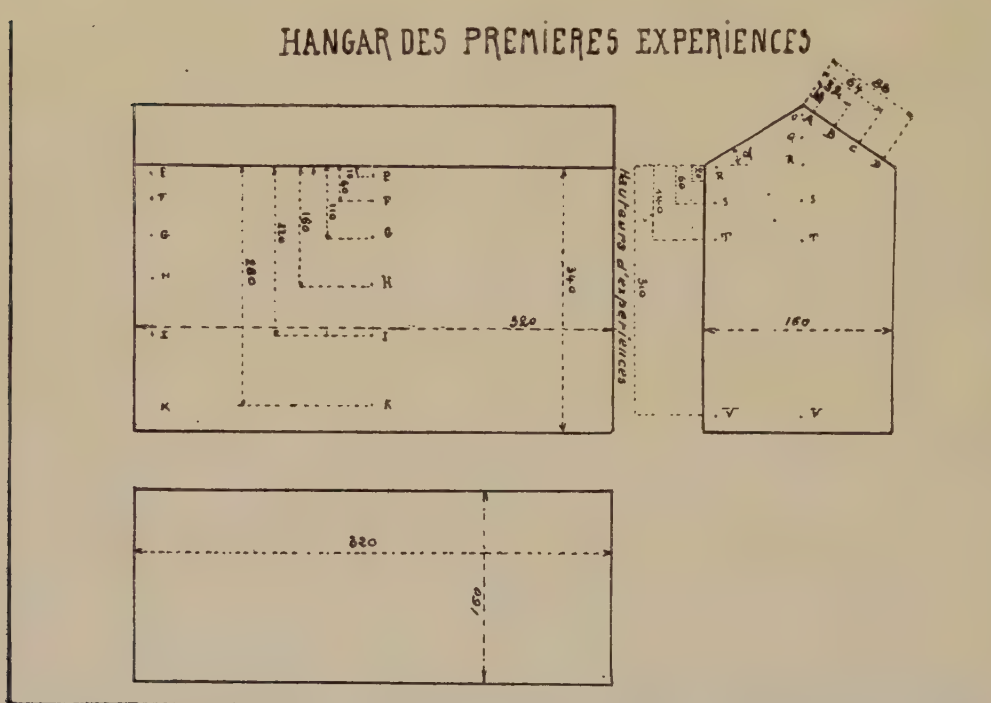
Les dispositions particulières adoptées dans chaque cas étaient les suivantes :

Hangars avec toiture terrasse : Largeur : 20 c/m.

Hangars avec toiture à 15 °, soit un angle de 8 degrés 30 minutes avec l'horizontale : Largeur : 10,5 c/m.

Hangar avec toiture à 30 °, soit un angle de 16 degrés 40 minutes avec l'horizontale : Largeur : 18,8 c/m.

Hangar avec toiture à 50 °, soit un angle de 25 degrés 30 minutes avec l'horizontale : Nous avons adopté dans ce cas les résultats trouvés dans l'étude générale faite précédemment avec le hangar de 32 c/m de longueur sur 16 de largeur.



Hangar avec toiture à 85 °, soit un angle de 40 degrés environ : Largeur : 15,5 c/m.

Hangar avec toiture de 175 °, soit un angle de 60 degrés environ : Largeur : 10,3 c/m.

Dans ces hangars, nous avons conservé dans toutes les variations ci-dessus énumérées les dimensions des pans de toiture qui sont tous uniformément de 50 c/m de longueur sur 10 de largeur.

Sur chacun de ces pans de toiture étaient fixés 4 tubes numérotés A B C D et disposés comme il suit (fig. 9) :

- A — 1,5 c/m du sommet de la toiture ;
- B — 3,75 c/m du sommet de la toiture ;
- C — 6 c/m du sommet de la toiture ;
- D — 8,25 c/m du sommet de la toiture ;

Ces tubes étaient disposés exactement dans le plan médian transversal du hangar.

Sur les façades longitudinales avant et arrière, nous avons ménagé 3 tubes E F G, disposés comme il suit (fig. 10) :

E — 8,5 c/m du sol figuré du hangar ;

F — 6 c/m du sol figuré du hangar ;

G — 1,5 c/m du sol figuré du hangar ;

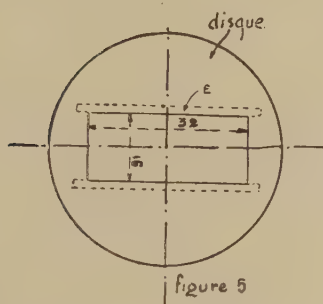


figure 5

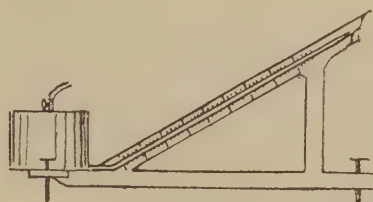


figure 6

Pour changer la pente de la toiture, on avait fabriqué à l'avance des pignons correspondant à chacun des hangars à étudier ; le hangar venant de servir était démonté et remonté avec un nouveau pignon, après un léger coup de rabot, donné

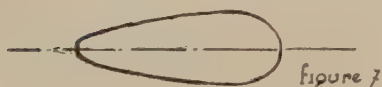


figure 7



figure 8

sur les bords des planchettes figurant les pans de toiture. De cette façon, on réalisait un ajustage parfait entre toutes les pièces du nouveau hangar. Les quelques vides qu'il pouvait y avoir malgré tout étaient bouchés avec du mastic.

Ces hangars, plus longs que les hangars employés précédemment, ne pouvaient pénétrer dans le trou rectangulaire du disque : il fallait recourir à un autre moyen de fixation.

Alors, nous avons ajouté aux différents hangars des pièces supplémentaires prenant exactement la forme du trou rectangulaire dans lequel passait le premier hangar.

Ces pièces étaient constituées par deux garnitures en bois dur qui s'appliquaient contre celles du disque et permettaient de fixer le hangar à celui-ci par des vis disposées à cet effet comme dans le cas précédent.

Hangar parabolique :

Nous avons étudié en troisième lieu un hangar à toiture de forme parabolique avec une flèche de $1/5$ de la portée.

Les dimensions de ce hangar étaient les suivantes (fig. 11) :

Longueur 32 cm ; largeur 17 cm ; flèche 3,4 cm ; hauteur de façade : 12 cm.

La toiture était constituée par une plaque en bois mince cintrée sur les pignons et fixée sur eux.

Les façades et les pignons étaient constitués comme pour les autres hangars.

La disposition des tubes sur la toiture de ce hangar était la suivante :

Sur la courbe déterminée par la toiture, nous avons compté les longueurs à partir du sommet et prises en suivant la courbe de toiture. •

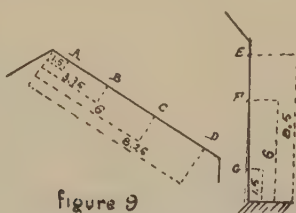


figure 9



figure 10



figure 11

A. — A 1,5 cm du sommet du hangar ;

B. — A 3,75 cm du sommet du hangar ;

C. — A 6 cm. du sommet du hangar ;

D. — A 8 cm. du sommet du hangar.

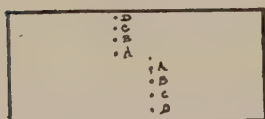


figure 12



figure 13

Ces points étaient disposés sur une ligne placée à un centimètre de distance du plan médian transversal du hangar et de telle sorte que la ligne des tubes de l'un des versants soit symétrique à celle de l'autre versant, par rapport au plan médian transversal (fig. 12).

Nous avons disposé sur les façades avant et arrière de ces hangars trois trous E F G, placés comme il suit :

E. — A 10,75 cm. de la base ;

B. — A 8,25 cm. de la base ;

G. — A 4 cm. de la base.

Ce hangar ne correspondant pas à ceux des premières expériences, en raison de sa largeur, nous avons employé, pour sa fixation, le dispositif exposé pour les hangars utilisés dans l'étude des variations des efforts suivant l'inclinaison de la toiture.

Outre ces dispositifs expérimentaux que nous venons d'exposer, nous avons voulu étudier l'influence d'une corniche sur une toiture. Pour cela, nous avons fixé sur le côté d'un hangar et suivant la pente de la toiture, une petite plaque d'aluminium disposée dans le même plan que la toiture et débordant la façade de 8 m/m environ.

Ces dernières observations ont été faites avec le hangar des premières expériences.

Pendant qu'on lisait au micromanomètre l'effort F en un point quelconque, suivant la méthode décrite plus haut, on faisait simultanément, sur un autre micromanomètre, une autre lecture de pression correspondant à la vitesse du courant d'air à l'intérieur de la soufflerie

Cette vitesse était réglée au moyen d'un rhéostat agissant sur le courant moteur de l'hélice de la soufflerie et maintenue dans les environs de 40 mètres-secondes.

Cette pression H_s étant déterminée, et les valeurs de pression atmosphérique et de température étant connues, nous déterminions pour 15 degrés et 760 m/m la valeur de la vitesse et la valeur de K par la formule :

$F = K S V^2$ en prenant $S = 1$, puisque aucune hypothèse de surface n'a été faite.

CHAPITRE V

Constance du coefficient K

Les expériences que nous avons faites au laboratoire de Saint-Cyr ont eu pour but la détermination des différentes valeurs de K dans la formule

$$F = K S V^2,$$

c'est-à-dire du coefficient applicable au point étudié dans les conditions ou celui-ci se trouvait au moment de l'expérience.

Pour que ce coefficient soit valable et puisse être appliqué aux bâtiments de grandeurs usuelles, il fallait démontrer, comme l'a fait EIFFEL, une similitude des efforts entre des bâtiments d'expérience de différentes dimensions.

Nous avons relaté cette expérience antérieurement et nous admettrons les résultats trouvés.

Il fallait d'autre part vérifier que le coefficient K était bien constant, quand une variation de la vitesse survenait.

Cette deuxième expérience, nous l'avons faite en nous servant du premier hangar décrit plus haut avec une toiture dont la pente est à 50 % et une façade de 60 m/m de hauteur. Nous avons étudié les points B C D E F de pignon, sous un angle de 300 degrés.

Nous avons trouvé pour les deux vitesses du courant d'air 40 mètres/seconde et de 20 mètres/seconde, les résultats suivants pour les valeurs de K :

	B	C	D	E	F
Vitesse de 40 mètres/seconde :	0,0240	0,0206	0,0228	0,0065	0,0070
— 20 —	0,0230	0,0215	0,0224	0,0061	0,0067

Une autre expérience faite avec le même hangar, mais avec une hauteur de 320 m/m et en se servant des points F G K T V a donné avec un angle du hangar de 330 degrés, les résultats suivants pour les valeurs de K.

	F	G	K	T	V
Vitesse de 10 mètres/secondes :	0,0000	0,0018	0,0018	0,0003	0,0003
— 20 —	0,0000	0,0015	0,0015	0,0003	0,0003
— 30 —	0,0000	0,0014	0,0015	0,0003	0,0003
— 40 —	0,0000	0,0013	0,0014	0,0003	0,0003

Des résultats précédents, il résulte que ce coefficient K est sensiblement constant. En effet, les variations ne portent guère que sur la quatrième décimale et presque toujours d'une façon suffisamment faible pour qu'on puisse supposer que les erreurs d'expériences seules ont suffi pour motiver ces variations.

D'ailleurs, au cours de nos observations, nous avons plusieurs fois vérifié cette constance qui s'est toujours trouvée confirmée.

Nous pouvons donc admettre que les efforts dus au vent peuvent s'exprimer par la formule.

$$dF = K dS V^2$$

Formule dans laquelle nous pouvons admettre en nous basant sur les expériences d'EIFFEL et sur celles relatées plus haut, que le coefficient K sera susceptible d'être appliqué à un bâtiment de dimensions quelconques et quelle que soit la vitesse du vent.

Ce résultat étant admis, nous ferons les expériences suivantes :

- I. — *Influence de l'orientation du hangar par rapport au vent ;*
- II. — *Influence de la hauteur de la façade longitudinale du hangar ;*
- III. — *Influence de la pente de toiture.*

La connaissance des variations des valeurs de K dans chacune de ces expériences, nous permet de chercher à appliquer en un point quelconque d'un bâtiment de forme simple, le coefficient qui lui est propre quand la construction est soumise à l'action du vent.

Ce coefficient ne sera évidemment qu'une valeur approchée mais qui sera vraisemblablement suffisante.

Les formes très diverses des bâtiments courants ne nous permettent pas un but plus précis, les applications au calcul de résistance de matériaux ne nous demandant d'ailleurs ordinairement, qu'un coefficient maximum maximorum ou minimum minimorum.

Trois éléments peuvent faire varier dans un hangar les efforts dus au vent. Ce sont :

- I. — *La direction du vent ;*
- II. — *La pente de la toiture ;*
- III. — *La hauteur de cette toiture.*

Un autre élément pourrait éventuellement influencer sur ces efforts, c'est la longueur du bâtiment, la largeur restant constante. Nous montrerons par la suite que c'est surtout la surface d'attaque du bâtiment qui influe, plutôt que cette longueur elle-même.

CHAPITRE VI

Première expérience sur l'influence de la direction du vent

La première expérience exécutée au laboratoire de St-Cyr a porté sur la recherche de l'influence de la direction du vent sur les efforts supportés par une toiture.

Nous avons choisi pour cette première expérience un hangar dont la toiture avait une inclinaison de 50 % et dont les dimensions étaient les suivantes :

Longueur : 320 m/m ; largeur : 160 m/m ; hauteur de façade : 140 m/m.

Ces dimensions correspondent aux proportions employées habituellement dans les hangars nous aurons donc des résultats applicables dans la pratique.

L'expérience a porté sur l'étude des points :

$(A B C D)_M$, $(A B C D)_P$, $(E F G)_M$, $(O Q R S T)_C$ et $(R S T)_B$, $(E F G)_P$.

Nous avons fait une observation pour chacun des points ci-dessus en donnant à l'angle α d'inclinaison du hangar, avec la direction du vent des valeurs croissantes de 30° en 30°.

Pour avoir la totalité des résultats, nous avons dû faire une série de lectures et nous résumons ci-dessous, les conditions dans laquelle nous avons opéré :

Pour $(A B C D)_M$ et $(E F G)_M$ avec α variant de 0 à 180 degrés.

Pour $(A B C D)_P$, $(E F G)_P$ et $(R S T)_B$ avec α variant de 0 à 360 degrés.

Pour $(O Q R S T)_C$ avec α variant de 90° à 270°.

Nous allons donner ci-dessous le tableau des résultats trouvés dans l'étude de chacune de ces séries d'observations.

Nous rappelons que le 0 de l'angle α d'inclinaison du hangar sur la direction du vent correspond au cas où le vent frappe directement la façade, c'est-à-dire lorsque la direction du courant d'air est perpendiculaire à la direction de la longueur du bâtiment.

TABLEAU $(A B C D)_M$

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A_M	B_M	C_M	D_M
0	— 0,0204	— 0,0051	— 0,0068	— 0,0504
30	— 0,0323	— 0,0126	— 0,0512	— 0,0520
60	— 0,0403	— 0,0262	— 0,0136	— 0,0472
90	— 0,0612	— 0,0592	— 0,0586	— 0,0602
120	— 0,0625	— 0,0675	— 0,0620	— 0,0572
150	— 0,0462	— 0,0442	— 0,0467	— 0,0480
180	— 0,0374	— 0,0380	— 0,0402	— 0,0425

Cette expérience a été faite seulement avec α variant de 0° à 180° car le plan de ces points est un plan médian transversal et il s'en suit que les positions du

hangar au delà de 180° correspondraient exactement à celles que nous avons observées et dont les résultats sont dans le tableau ci-dessus.

TABLEAU (E F G)_M

Angle α	Valeur du coefficient K		
	E _M	F _M	G _M
0	+ 0,0585	+ 0,0586	+ 0,0570
30	+ 0,0303	+ 0,0590	+ 0,0560
60	+ 0,0000	+ 0,0131	+ 0,0152
90	— 0,0592	— 0,0570	— 0,0515
120	— 0,0555	— 0,0586	— 0,0510
150	— 0,0470	— 0,0475	— 0,0480
180	— 0,0382	— 0,0378	— 0,0360

Même observation que pour les points précédents, puisque ceux-ci se trouvaient dans le même plan médian que les premiers.

TABLEAU (A B C D)_P

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0210	— 0,0137	— 0,0097	— 0,0695
30	— 0,0125	— 0,0000	+ 0,0084	+ 0,0296
60	— 0,1040	— 0,1060	+ 0,0500	— 0,0530
90	— 0,0550	— 0,0550	— 0,0562	— 0,0560
120	— 0,0620	— 0,0515	— 0,0565	— 0,0640
150	— 0,0410	— 0,0415	— 0,0462	— 0,0470
180	— 0,0380	— 0,0412	— 0,0403	— 0,0422
210	— 0,0510	— 0,0502	— 0,0500	— 0,0540
240	— 0,0590	— 0,0575	— 0,0545	— 0,0545
270	— 0,0060	— 0,0063	— 0,0083	— 0,0108
300	— 0,0225	— 0,0276	— 0,0400	— 0,0430
330	— 0,0200	— 0,0240	— 0,0445	— 0,0450

TABLEAU (E F G)_P

Angle α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0510	+ 0,0490	+ 0,0495
30	+ 0,0566	+ 0,0620	+ 0,0615
60	+ 0,0069	— 0,0019	+ 0,0144
90	— 0,0550	— 0,0560	— 0,0618
120	— 0,0530	— 0,0486	— 0,0472
150	— 0,0448	— 0,0440	— 0,0450
180	— 0,0405	— 0,0374	— 0,0365
210	— 0,0480	— 0,0426	— 0,0382
240	— 0,0554	— 0,0550	— 0,0390
270	— 0,0114	— 0,0126	— 0,0112
300	— 0,0139	— 0,0134	— 0,0180
330	+ 0,0173	+ 0,0167	+ 0,0020

TABLEAU (O Q R S T)_C

Angle α	Valeur du coefficient K				
	O	Q	R	S	T
90	+ 0,0350	+ 0,0537	+ 0,0580	+ 0,0625	+ 0,0615
120	+ 0,0272	+ 0,0488	+ 0,0554	+ 0,0605	+ 0,0606
150	— 0,0000	+ 0,0077	+ 0,0102	+ 0,0157	+ 0,0132
180	— 0,0990	— 0,0800	— 0,0765	— 0,0772	— 0,0765
210	— 0,0430	— 0,0415	— 0,0422	— 0,0432	— 0,0430
240	— 0,0430	— 0,0435	— 0,0445	— 0,0437	— 0,0410
270	.. 0,0090	— 0,0134	— 0,0147	— 0,0122	— 0,0083

Tous ces points se trouvant dans le plan médian longitudinal, toutes les autres positions du hangar donneraient des valeurs semblables à celles trouvées pour α compris entre 90° et 270°, valeurs qui ont été transcrites dans le tableau ci-dessus.

TABLEAU (R S T)_B

Angle α	Valeur du coefficient K		
	R	S	T
0	— 0,0352	— 0,0375	— 0,0336
30	— 0,0212	— 0,0183	— 0,0183
60	+ 0,0124	+ 0,0197	+ 0,0153
90	+ 0,0500	+ 0,0580	+ 0,0465
120	+ 0,0535	+ 0,0610	+ 0,0595
150	— 0,0083	— 0,0130	— 0,0105
180	— 0,0910	— 0,0850	— 0,0980
210	— 0,0391	— 0,0404	— 0,0410
240	— 0,0354	— 0,0364	— 0,0376
270	— 0,0122	— 0,0130	— 0,0116
300	— 0,0473	— 0,0475	— 0,0410
330	— 0,0446	— 0,0452	— 0,0458

Ces résultats nous ont permis de tracer les courbes représentatives des efforts agissant sur la toiture et sur les parois du hangar.

Cela au moyen du coefficient K qui est l'élément variable dans la formule $F = K S V_2$ puisque S et V sont des données d'application.

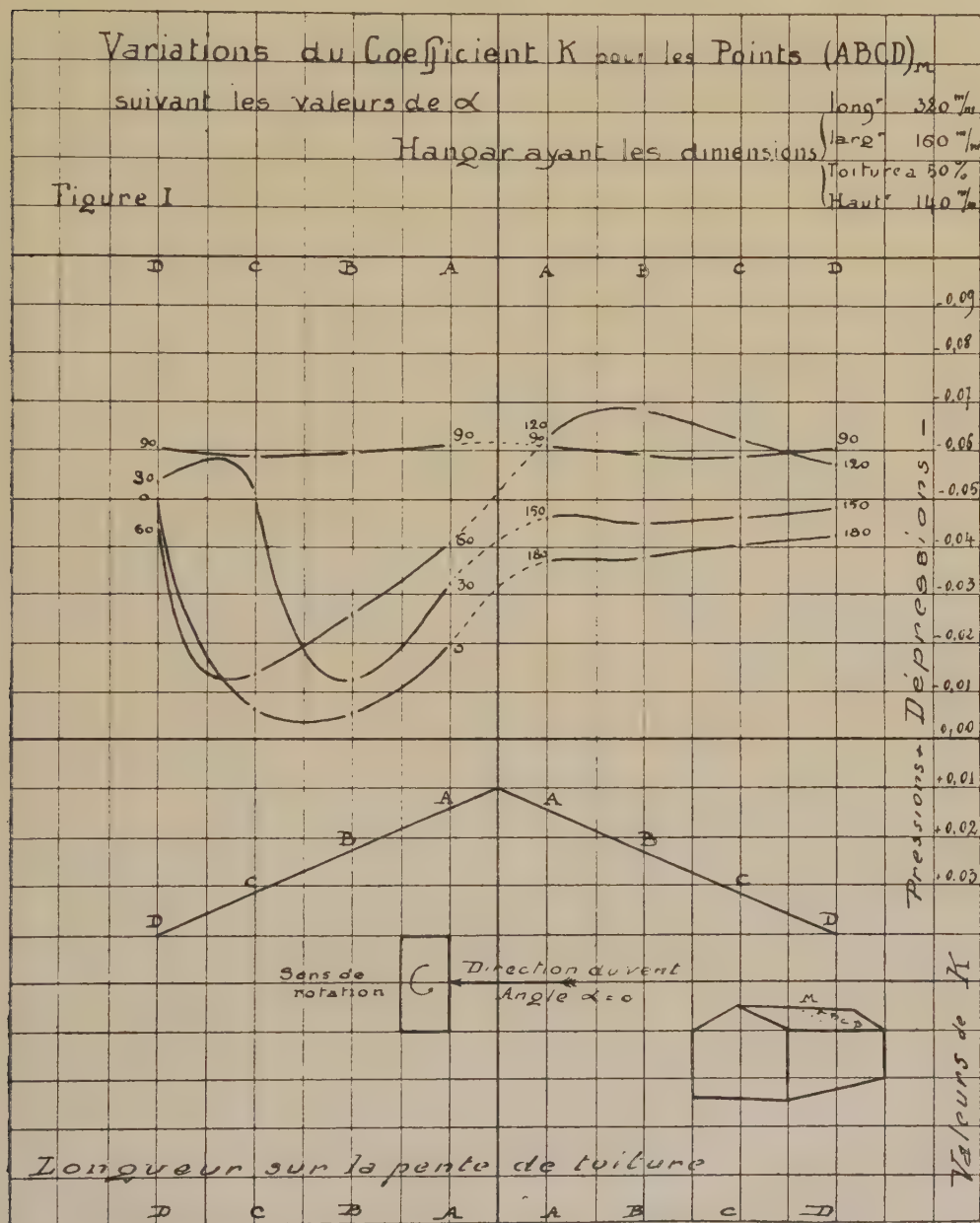
Sur la figure 1, nous avons représenté les variations du coefficient K sur la ligne (A B C D)_M c'est-à-dire suivant le plan médian de la toiture quand l'angle α d'orientation du hangar, par rapport au courant d'air, varie de 0° à 180°.

Nous avons porté en ordonnées les différentes valeurs de K et en abscisse, les longueurs mesurées suivant la pente de la toiture, et exprimant les distances du sommet de celle-ci à chacun des tubes du hangar.

$$AB = BC = CD = 22,5 \text{ millimètres.}$$

Pour plus de commodité, ces longueurs ont été représentées par 20 millimètres sur la figure.

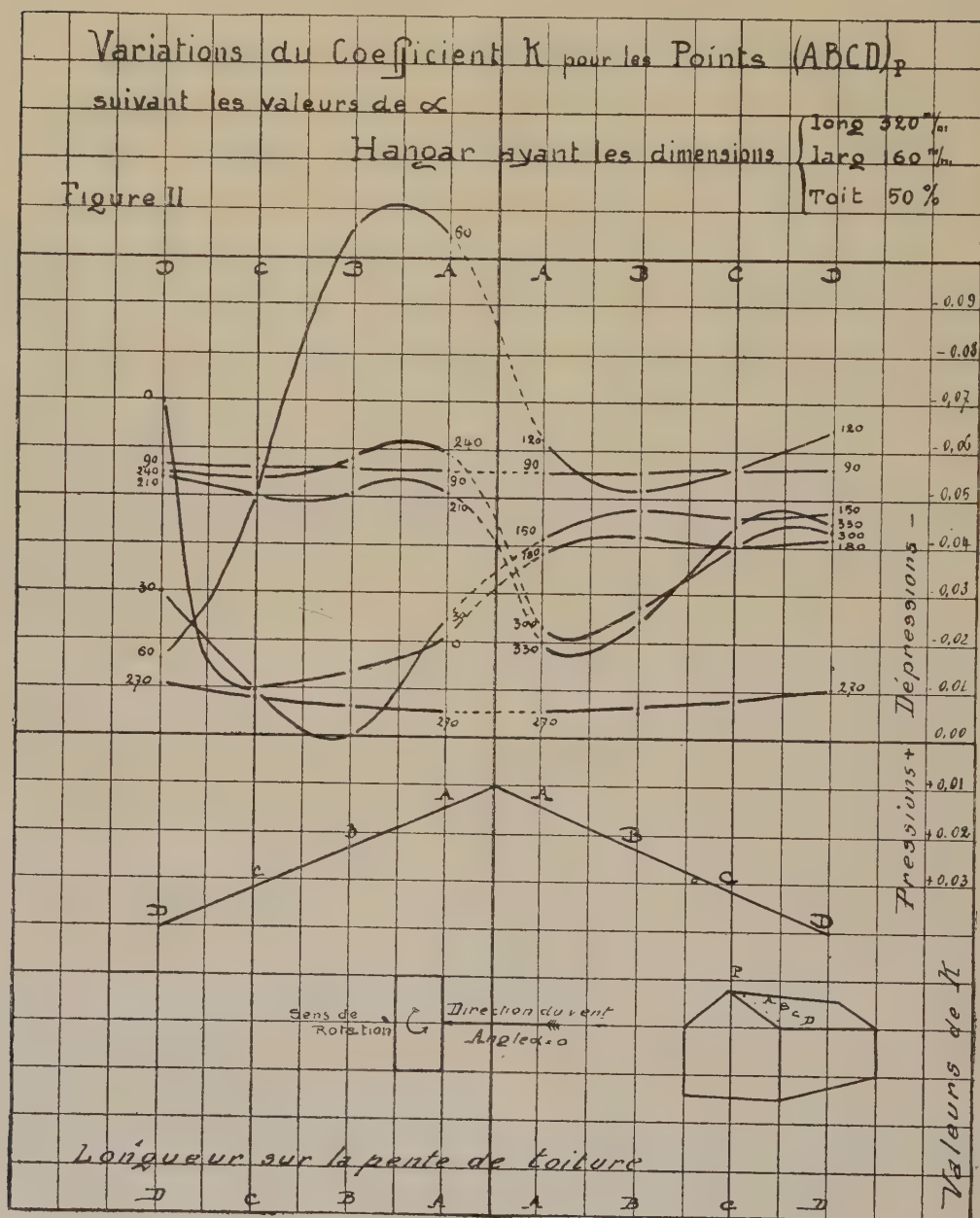
Une courbe a été tracée pour chacune des observations à 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° et 180° .



Nous remarquerons que sur le bord de la toiture (Points D), nous avons une succion très accentuée correspondant à une valeur du coefficient de $-0,0500$ et $-0,0600$.

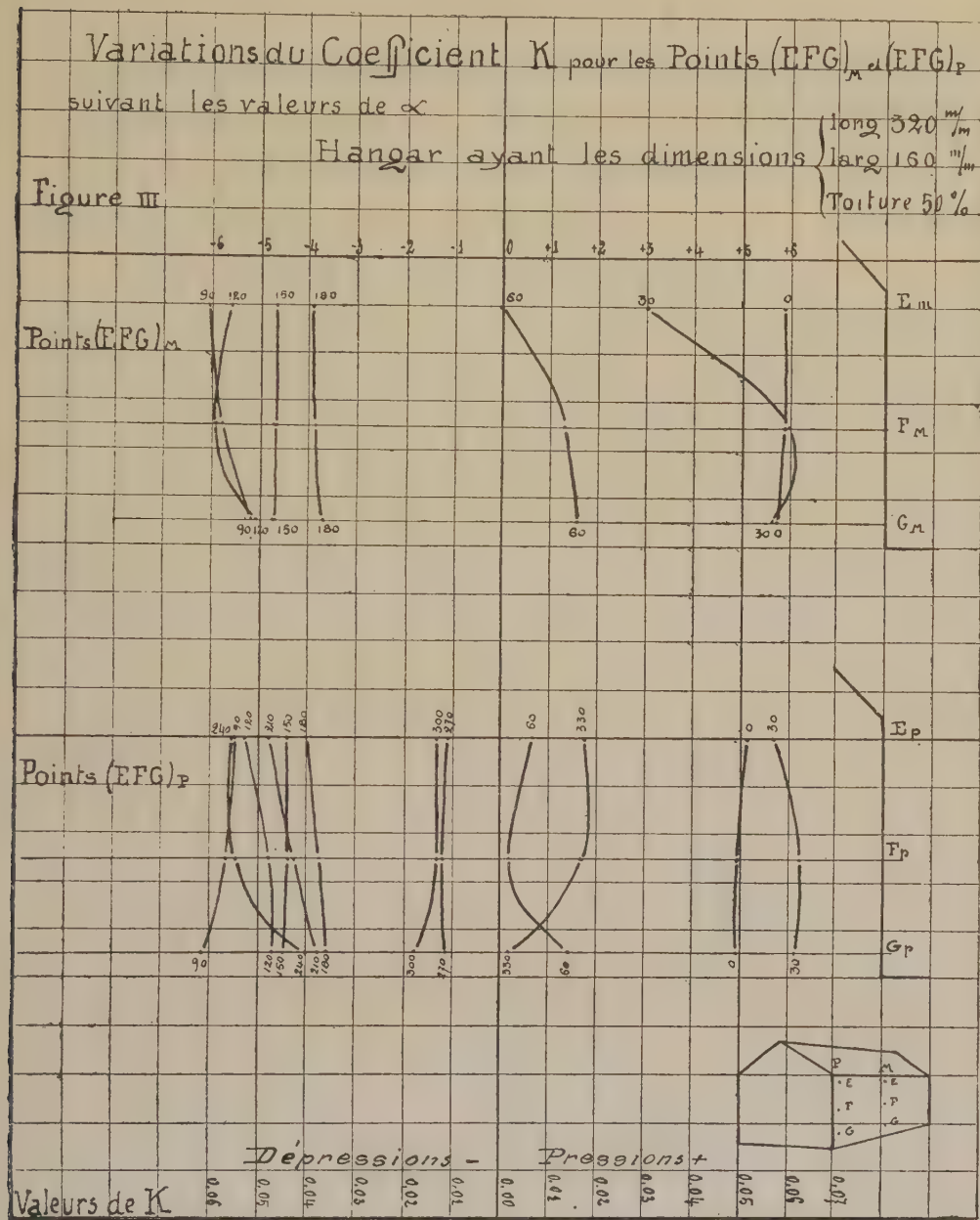
Vers le milieu de la toiture, cette courbe passe par un minimum, puis croît ensuite régulièrement jusqu'au faîte.

Sur l'autre versant de la toiture, la valeur du coefficient est sensiblement constante pour une même valeur de α quelque soit le point considéré.



Nous remarquerons, en outre, que la succion semble augmenter en même temps que la toiture tourne, pour aller d'une position perpendiculaire au sens du vent, $\alpha=0$ jusqu'à une position parallèle $\alpha=90^\circ$. Nous n'avons pas pu déterminer exactement les valeurs au sommet du toit. En ce point se produisait vraisemblablement des remous qui ne permettaient pas une observation précise. Nous remarquons

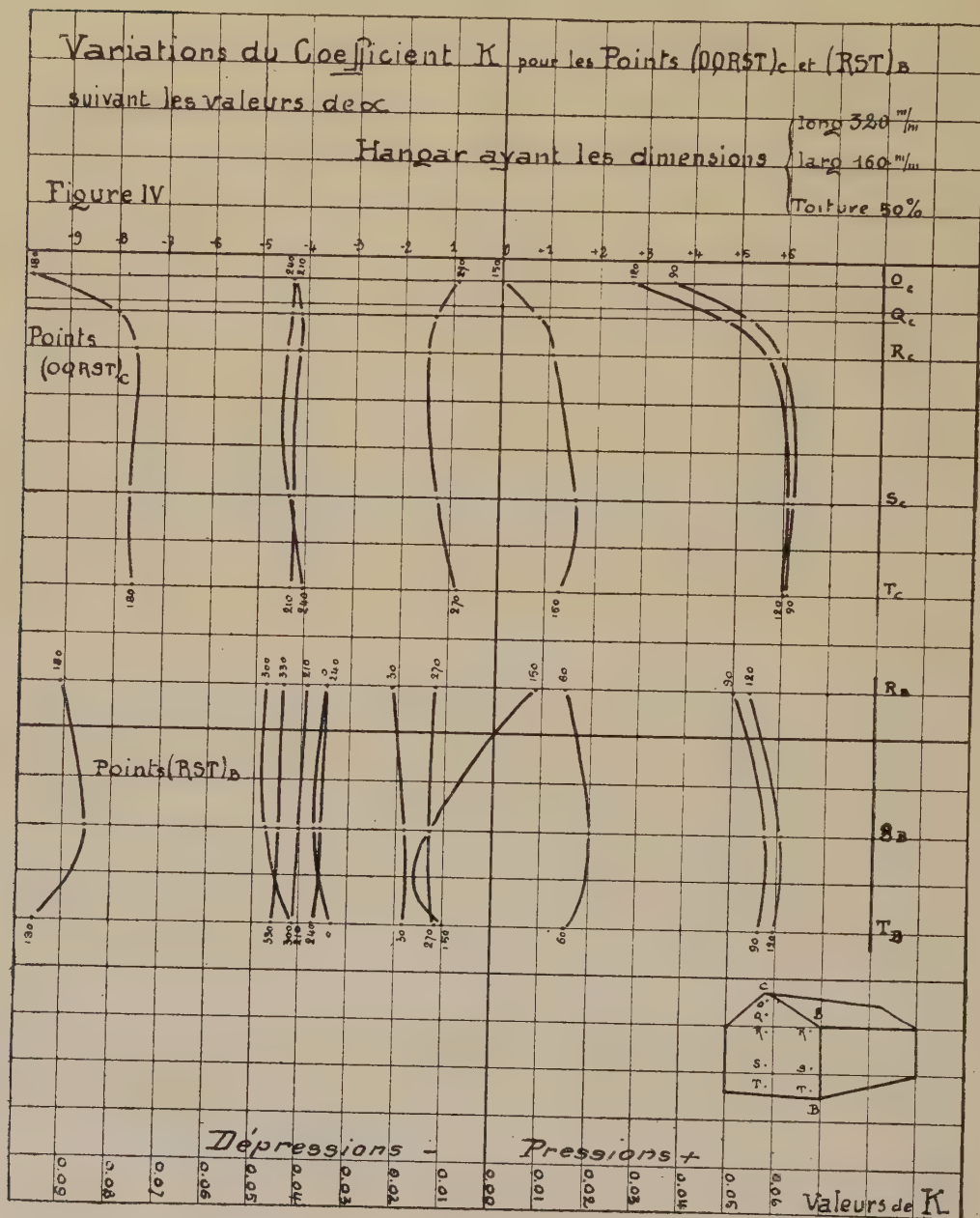
cependant sur la figure 1 que les courbes sur l'un des versants semblent se prolonger sur l'autre.



Sur la figure 2, sont représentées la variation du coefficient K pour les points $A B C D_p$. Nous avons indiqué comme sur la figure 1 la continuité entre les efforts sur l'un et sur l'autre versant.

En abscisse sont portées les longueurs suivant la pente de la toiture et en ordonnée les différentes valeurs du coefficient K .

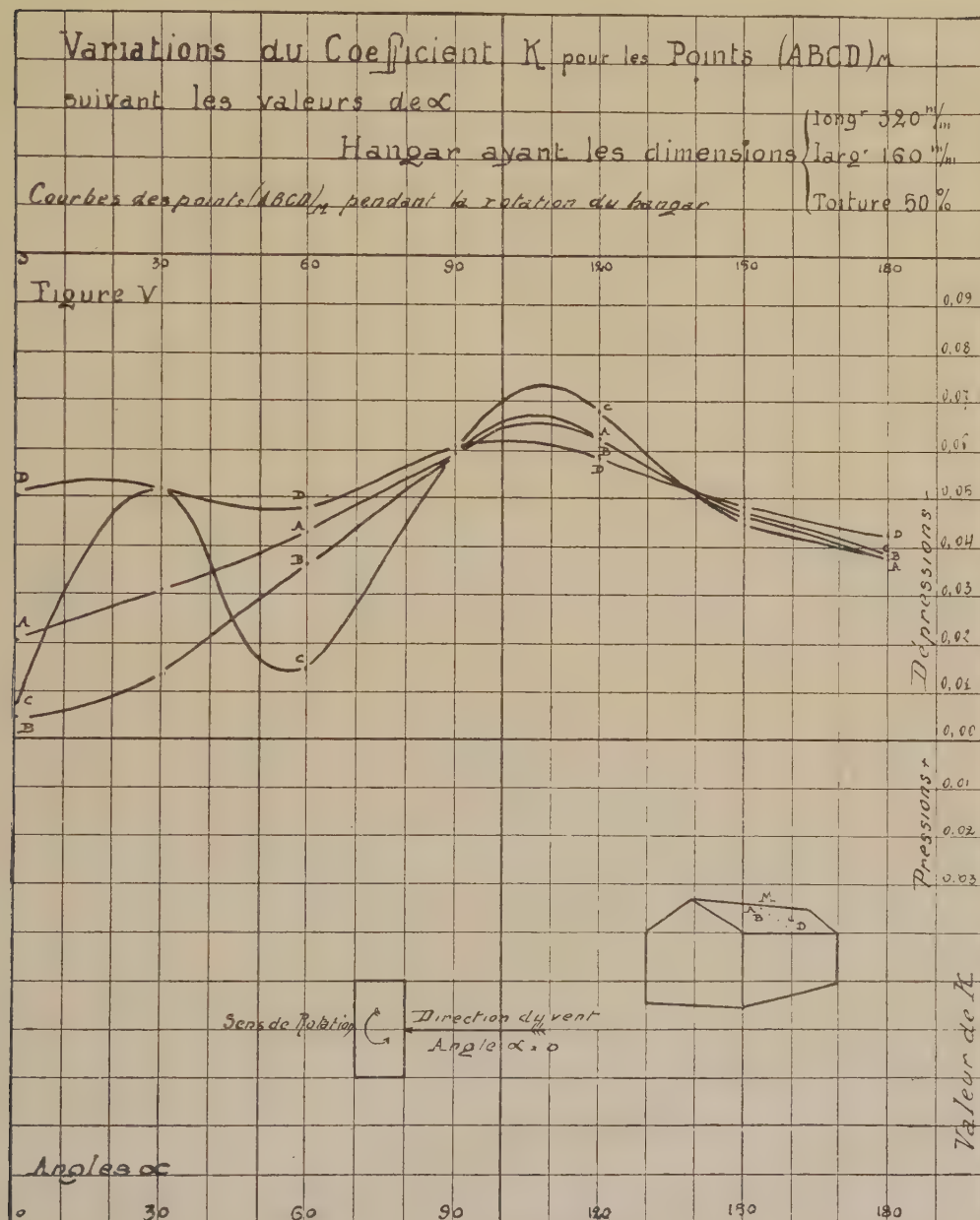
Une courbe a été construite pour chaque position du hangar dans sa rotation.
 0-180, 30-150, 60-120, 90-90, 210-330, 240-300, 270-270.



Un fait remarquable est à signaler dans ces courbes, c'est le maximum atteint par le coefficient K pour une valeur de α d'environ 60° . Ce maximum correspond à environ $K=0,1100$ et est atteint presque au sommet de la toiture entre les points A et B, les efforts décroissant ensuite très rapidement.

Il y a d'ailleurs entre les valeurs de $\alpha=30^\circ$ et 60° une variation très considé-

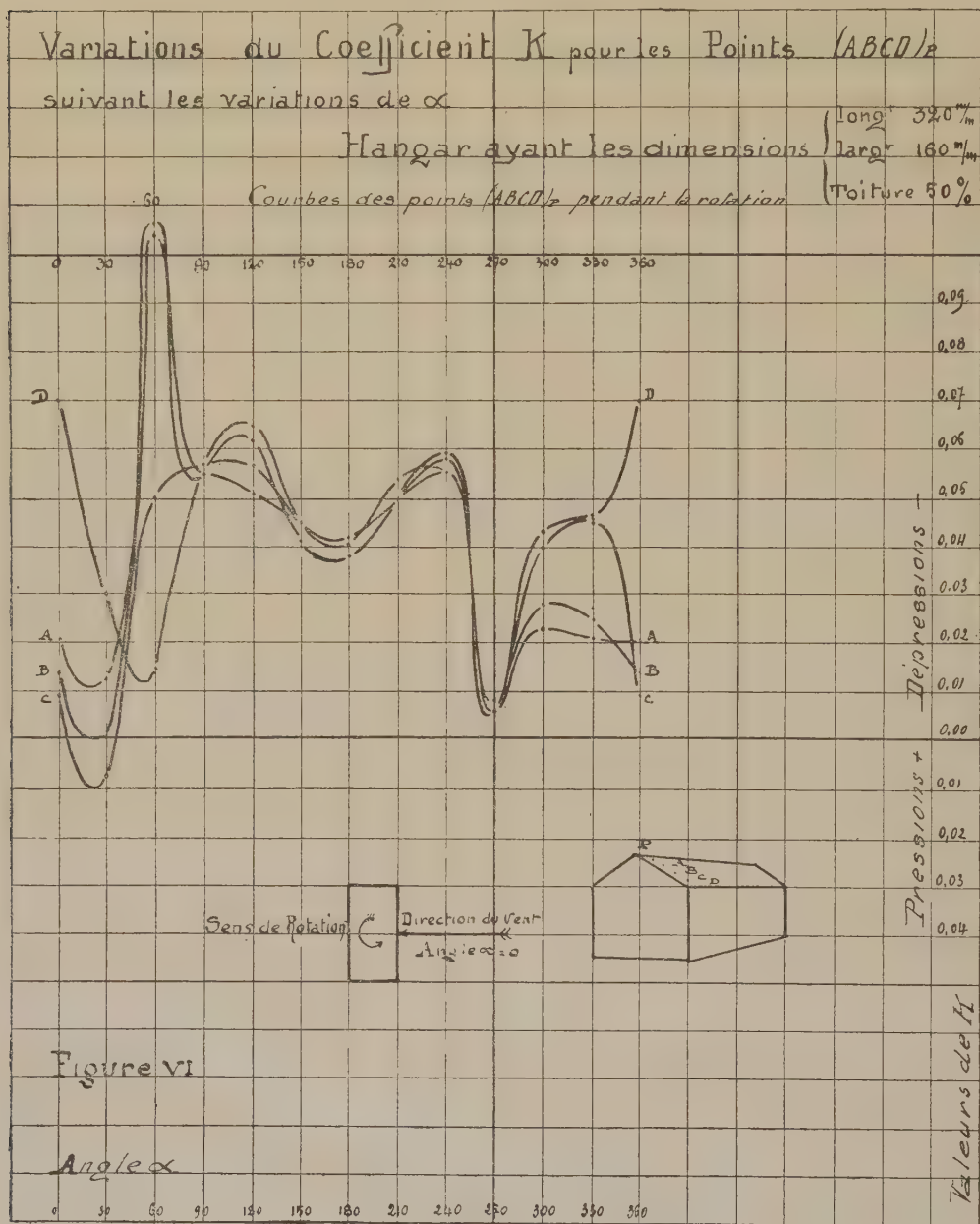
table du coefficient K qui passe de 0,0000 à - 0,1100 pour revenir $\alpha = 90^\circ$ à environ - 0,0500.



Nous ferons remarquer la faible valeur de K pour $\alpha = 270^\circ$, nous nous occuperons ultérieurement de la signification de ce résultat.

Sur la figure 3, nous avons représenté en abscisse les valeurs de K et en ordonnée les hauteurs des différents points d'observation E F G. On ne peut faire d'autres remarques à la suite de l'examen de ces courbes, que celles de l'aspect

presque rectiligne de la majorité de celles-ci. Observons cependant que toutes les courbes positives des points (E F G)_M, c'est-à-dire où les efforts du vent se tra-

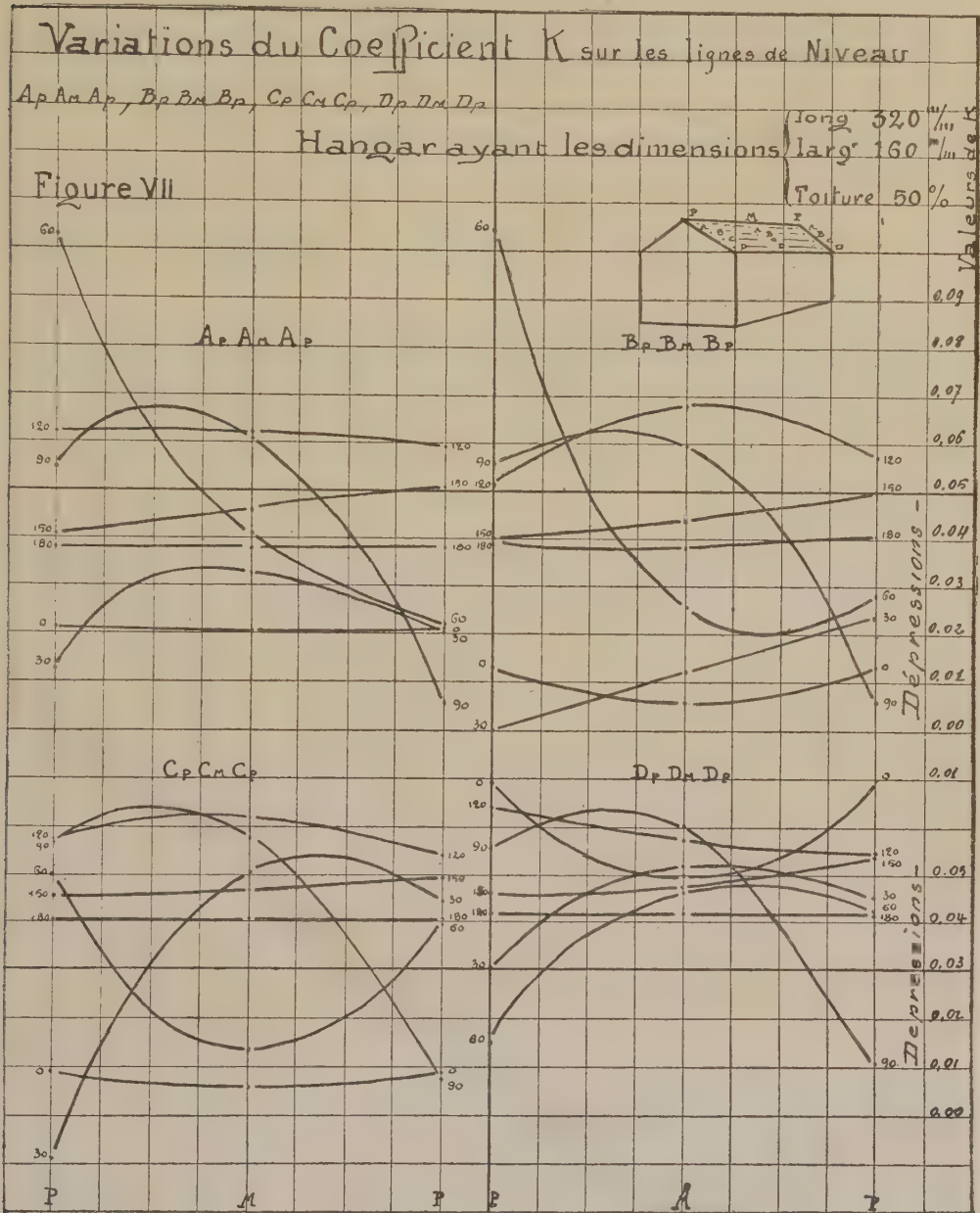


duisent par une pression, décroissent très rapidement en arrivant à la toiture.

Pour la figure 4, les courbes ont été construites de la même façon que pour la figure 3 ; nous y ferons les mêmes observations et, en particulier, nous remarquerons la décroissance rapide des pressions vers l'arrivée à la toiture.

La figure 5 représente pour chacun des points (A B C D)_M les variations du

coefficient K dans la rotation du hangar. Ces courbes sont construites en portant en abscisse les différentes valeurs de α angle de rotation et en ordonnée les valeurs



du coefficient K . Nous remarquerons alors la similitude des courbes à partir de la valeur de α correspondant à 90° .

En avant de cet angle, une certaine irrégularité est à observer correspondant à la variation du coefficient selon la ligne médiane de toiture.

Sur la figure 6 représentant dans les mêmes conditions que dans la figure 5, les variations du coefficient K pour les points (A B C D)_p dans la rotation du

hangar, nous observons une certaine similitude entre les courbes à partir de la position $\alpha = 90^\circ$.

En avant de cet angle, il y a des variations très considérables de la valeur de K , laquelle décroît de $-0,0100$ à $0,1100$. Cette variation des efforts sur les toitures aux abords des pignons, correspond aux courbes que nous avons tracées figure 2.

Enfin, sur la figure 7, nous avons représenté les courbes sur des efforts agissant dans le sens de la longueur du hangar sur les lignes :

$$A_P - A_M - A_P, \quad B_P - B_M - B_P, \quad C_P - C_M - C_P, \quad D_P - D_M - D_P.$$

Nous avons porté en abscisse les longueurs dans le sens longitudinal du hangar depuis le bord d'attaque du courant d'air, et pour chaque ligne une courbe a été faite pour chacune des valeurs de α .

Nous avons à signaler pour les lignes des A et des B les grandes valeurs du coefficient K pour la succion dans les positions du hangar correspondant à $\alpha = 60^\circ$.

Dans la position du hangar $\alpha = 90^\circ - 270^\circ$, les courbes sont encore remarquables par leur décroissance rapide dans leur deuxième moitié.

CHAPITRE VII

Deuxième expérience. — Hangar de 20^m/_m de hauteur de façade

La deuxième expérience que nous avons faite a porté sur l'influence de la hauteur de la façade d'un hangar, sur les efforts agissant sur les parois de celui-ci.

Pour cela, nous avons fait varier la hauteur suivant le procédé que nous avons décrit plus haut et nous avons fait les expériences avec les hauteurs suivantes :

$$H = 20 \text{ m/m} \text{ — } H = 60 \text{ m/m} \text{ — } H = 140 \text{ m/m} \text{ — } H = 320 \text{ m/m}.$$

Nous nous servirons pour la troisième hauteur des résultats déjà acquis dans le chapitre précédent.

Pour chacune de ces hauteurs, nous avons observé les différentes valeurs du coefficient K dans la rotation du hangar, pour chacun des points que nous avons désigné plus haut.

Expérience sur un hangar de hauteur $H = 20 \text{ m/m}$.

Pour obtenir les résultats d'expérience, nous avons procédé comme suit pour nos lectures :

Les points (A B C D)_M ont été observés de 0° à 180° ;

Les points (A B C D)_P ont été observés de 0° à 330° ;

Le point E_M a été observé de 0° à 180° ;

Le point E_P a été observé de 0° à 330° ;

Le point O_C a été observé de 90° à 270°.

Nous avons représenté dans le même tableau les points E_M - E_P - O_C qui sont les points des façades et des pignons.

TABLEAU (A B C D)_M

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0089	— 0,0111	+ 0,0280	+ 0,0304
30	— 0,0216	— 0,0007	+ 0,0176	+ 0,0238
60	— 0,0262	— 0,0172	— 0,0000	+ 0,0002
90	— 0,0062	— 0,00615	— 0,0000	— 0,00615
120	— 0,0635	— 0,0840	— 0,0109	— 0,0077
150	— 0,0535	— 0,0552	— 0,0590	— 0,0600
180	— 0,0352	— 0,0383	— 0,0426	— 0,0464

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	+ 0,0070	+ 0,0060	+ 0,0157	+ 0,0230
30	+ 0,0100	+ 0,0137	+ 0,0288	+ 0,0365
60	— 0,0340	— 0,0099	+ 0,0034	+ 0,0093
90	— 0,0670	— 0,0670	— 0,0750	— 0,0485
120	— 0,0665	— 0,0790	— 0,0745	— 0,0730
150	— 0,0610	— 0,0728	— 0,0700	— 0,0665
180	— 0,0400	— 0,0425	— 0,0460	— 0,0472
210	— 0,0330	— 0,0340	— 0,0360	— 0,0400
240	— 0,0440	— 0,0437	— 0,0219	— 0,0109
270	— 0,0100	— 0,0102	— 0,0106	— 0,0113
300	— 0,0160	— 0,0154	— 0,0135	— 0,0123
330	— 0,0085	— 0,0079	— 0,0016	+ 0,0015

Valeurs de α	Valeur du coefficient K		
	E_p	E_m	O_c
0	+ 0,0324	+ 0,0386	
30	+ 0,0400	+ 0,0305	
60	+ 0,0140	+ 0,0061	
90	— 0,0312	— 0,0056	+ 0,0570
120	— 0,0530	— 0,0027	+ 0,0405
150	— 0,0556	— 0,0425	— 0,0069
180	— 0,0106	— 0,0353	— 0,0480
210	— 0,0316		— 0,0318
240	— 0,0073		— 0,0081
270	— 0,0475		— 0,0105
300	— 0,0059		
330	+ 0,0156		

Nous représenterons pour cette hauteur les différentes courbes suivantes :

1° Figure 8. Les variations du coefficient K dans le plan médian du hangar suivant les points (A B C D)_M. Nous avons employé les mêmes notations que pour la figure 1.

2° Pour la figure 9, avec les mêmes notations que précédemment employées, nous avons représenté les variations du coefficient K, suivant la ligne (A B C D)_P.

Nous signalerons que dans la figure 1, la succion très forte au point D dans le cas précédent, où la hauteur de façade était de 140 millimètres, est devenue une pression. Il semble donc que c'est la présence de la façade qui est la cause de cette succion dans le premier cas. Cette succion n'a pas lieu dans le deuxième cas puisque la façade a une dimension très petite.

Il s'ensuit que les courbes des efforts sur le pan de toiture soumis au vent deviennent dans ce cas beaucoup plus rectilignes, que lorsque l'influence de la façade se fait sentir.

Pour la figure 9, nous aurons des résultats sensiblement de même ordre.

Nous avons représenté aussi sur les figures 10, 11 et 12 les variations des efforts suivant les valeurs du coefficient K sur les lignes horizontales des A, des B, des C et des D. Sur la figure 10 se trouve sur le schéma b₁ ; la variation de K sur la ligne des A et sur les schémas (a₁, a₂, a₃), les variations de K sur la ligne des B, des C et des D.

Nous retrouvons pour le point B la valeur de K maximum que nous avons trouvée sur la figure 7 $K = - 0,0840$.

CHAPITRE VIII

Troisième expérience : Hangar de 320^m/_m de hauteur de façade

Nous avons obtenu les résultats en faisant les lectures suivant l'ordre ci-dessous :

(A B C D)_M observés de 0° à 180°;

(A B C D)_P observés de 0° à 330°;

(E G K)_M observés de 0° à 180°;

(E G K)_P observés de 0° à 330°;

(R S T V)_B observés de 0° à 330°;

(O T V)_C observés de 0° à 90°.

TABLEAU (A B C D)_M

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A _m	B _m	C _m	D _m
0	— 0,0555	— 0,0745	— 0,0820	— 0,0786
30	— 0,0216	— 0,0355	— 0,0865	— 0,0755
60	— 0,0416	— 0,0307	— 0,0252	— 0,0680
90	— 0,0585	— 0,0585	— 0,0575	— 0,0580
120	— 0,0630	— 0,0710	— 0,0552	— 0,0610
150	— 0,0417	— 0,0430	— 0,0432	— 0,0430
180	— 0,0466	— 0,0386	— 0,0456	— 0,0480

TABLEAU (A B C D)_P

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A _p	B _p	C _p	D _p
0	— 0,0240	— 0,0253	— 0,0492	— 0,1320
30	— 0,0050	— 0,0020	— 0,0000	+ 0,0154
60	— 0,0740	— 0,0970	— 0,1150	— 0,0385
90	— 0,0500	— 0,0500	— 0,0505	— 0,0515
120	— 0,0600	— 0,0520	— 0,0560	— 0,0578
150	— 0,0195	— 0,0318	— 0,0338	— 0,0356
180	— 0,0340	— 0,0378	— 0,0356	— 0,0392
210	— 0,0400	— 0,0398	— 0,0398	— 0,0392
240	— 0,0510	— 0,0536	— 0,0530	— 0,0522
270	— 0,0432	— 0,0426	— 0,0445	— 0,0466
300	— 0,0290	— 0,0270	— 0,0492	— 0,0415
330	— 0,0405	— 0,0432	— 0,0564	— 0,0785

TABLEAU (E G K)_M

Angle α	Valeur du coefficient K		
	E _m	G _m	K _m
0	+ 0,0197	+ 0,0625	+ 0,0364
30	+ 0,0133	+ 0,0590	+ 0,0585
60	— 0,0130	+ 0,0139	+ 0,0156
90	— 0,0560	— 0,0560	— 0,0575
120	— 0,0590	— 0,0534	— 0,0490
150	— 0,0420	— 0,0384	— 0,0360
180	— 0,0446	— 0,0312	— 0,0290

TABLEAU (E G K)_P

Angle α	Valeur du coefficient K		
	E _p	G _p	K _p
0	+ 0,0143	+ 0,0422	+ 0,0425
30	+ 0,0370	+ 0,0615	+ 0,0610
60	— 0,0129	+ 0,0024	+ 0,0036
90	— 0,0526	— 0,0490	— 0,0520
120	— 0,0555	— 0,0530	— 0,0462
150	— 0,0392	— 0,0380	— 0,0385
180	— 0,0430	— 0,0428	— 0,0390
210	— 0,0440	— 0,0460	— 0,0308
240	— 0,0570	— 0,0650	— 0,0522
270	— 0,0485	— 0,0580	— 0,0625
300	— 0,0185	— 0,0218	— 0,0164
330	— 0,0000	— 0,0127	— 0,0134

TABLEAU (O T V)_M

Angle α	Valeur du coefficient K		
	O _c	T _c	V _c
0	— 0,0416	— 0,0408	— 0,0437
30	— 0,0032	+ 0,0078	+ 0,0153
60	+ 0,0180	+ 0,0580	+ 0,0605
90	+ 0,0260	+ 0,0625	+ 0,0610

TABLEAU (R S T V)_B

Angle α	Valeur du coefficient K			
	R _b	S _b	T _b	V _b
0	— 0,0428	— 0,0435	— 0,0476	— 0,0473
30	+ 0,0185	+ 0,0135	— 0,0114	— 0,0114
60	+ 0,0054	+ 0,0152	+ 0,0178	+ 0,0185
90	+ 0,0452	+ 0,0555	+ 0,0525	+ 0,0520
120	+ 0,0580	+ 0,0625	+ 0,0620	+ 0,0615
150	+ 0,0253	— 0,0240	— 0,0310	— 0,0400
180	— 0,0370	— 0,0360	— 0,0425	— 0,0427
210	— 0,0290	— 0,0292	— 0,0310	— 0,0318
240	— 0,0312	— 0,0367	— 0,0321	— 0,0320
270	— 0,0418	— 0,0398	— 0,0315	— 0,0271
300	— 0,0486	— 0,0512	— 0,0382	— 0,0327
330	— 0,0410	— 0,0400	— 0,0333	— 0,0333

Ces tableaux ont été représentés par des courbes dans les figures 13, 14, 15, 16, 17 et 18.

Sur la figure 18, sont représentées les variations du coefficient K dans le plan médian transversal du hangar, suivant la ligne (A B C D)_M. cela, pour les différentes valeurs de α pour lesquelles une expérience a été faite dans les mêmes conditions que pour les figures 1 et 8 déjà étudiées.

Nous remarquerons que les succions au point D sont plus fortes que celles observées dans la première expérience au même point.

Alors que dans la figure 8, les courbes des efforts sur le versant de toiture non soumis au vent subissaient des variations très considérables, nous observons un groupement de ces courbes sensiblement analogue à celui indiqué dans la figure A.

Dans la figure 14, sont représentées les variations du coefficient K, quand on se déplace sur la ligne (A B C D)_P. Dans ce cas, nous observons comme dans la figure 13, une augmentation de succion sur le point D par rapport à ce qui a été observé sur la figure 2, et même observation que précédemment quant au groupement des courbes sur le versant non soumis à l'action directe du vent.

Sur la figure 15, nous avons tracé la courbe du K quand on se déplace sur la façade suivant la ligne (E F G H I K)_M. Nous voyons les courbes de la face arrière bien groupées et un maximum pour la courbe correspondant à $\alpha = 0^\circ$. Nous remarquerons la décroissance très rapide des valeurs de K quand on examine les points voisins de la toiture.

Nous avons indiqué sur cette même figure les courbes obtenues pour les mêmes points dans le cas des hauteurs $H = 140$ m/m et $H = 20$ m/m. Nous ferons observer que pour cette dernière hauteur, le point E est relativement trop bas pour qu'on puisse remarquer la décroissance très rapide des valeurs de K dans le voisinage de la toiture ; cette décroissance n'en subsiste pas moins.

Sur la figure 16 sont étudiées les valeurs de K sur la ligne de façade correspondant aux points (E F G H I K)_P. Nous avons aussi représenté en traits mixtes les courbes dans le cas de la hauteur $H = 140$ millimètres.

Sur la figure 17 sont représentées les différentes courbes des variations du coefficient K, quand on se déplace horizontalement sur la ligne E_P E_m E_p, G_P G_m G_p, K_P K_m K_p.

Nous retrouvons pour ces courbes la très rapide diminution des valeurs, de K aux abords de la toiture. Il semble que la surface représentative des efforts sur la façade, fasse un ventre très accentué vers le milieu terminé à la partie supérieure et à la partie inférieure par des lignes presque droites.

Enfin, dans la figure 18, nous trouvons les courbes représentatives des valeurs de K quand on se déplace sur le pignon, suivant les lignes $(R\ S\ T\ V)_B$ et $(O\ T\ V)_C$.

Nous retrouvons sensiblement sur ces courbes les valeurs maximum indiquées sur les figures 15, 16 et 17. Il semble résulter de cette expérience que la valeur maximum de K reste la même quand le vent agit sur un plan quelles que soient les dimensions de celui-ci.

Un autre remarque est à faire ; c'est la faible valeur du coefficient K sur les plans verticaux, quand ceux-ci font un angle d'environ 30° , avec la direction du vent, ou 60° avec la normale à sa direction, puisque c'est ainsi que nous avons choisi les origines.

Pour cette position, nous remarquerons que K oscille autour de 0,0000.

CHAPITRE IX

Considérations sur les premières expériences

De façon à compléter les résultats acquis par les trois premières expériences, nous en avons fait une quatrième qui nous a permis d'obtenir certaines précisions, au sujet du tracé des courbes représentatives des valeurs du coefficient K.

Les observations ont été faites sur les points suivants :

$$(A B C D)_M \quad (A B C D)_P \quad E_m \quad E_p \quad F_m.$$

Les résultats ont été transcrits sur les tableaux suivants :

TABLEAU (A B C D)M

Angle α	Valeur du coefficient K			
	A_m	B_m	C_m	D_m
0	— 0,0135	— 0,0000	+ 0,0165	+ 0,0196
45	— 0,0310	— 0,0148	— 0,0014	+ 0,0014
90	— 0,0157	— 0,0154	— 0,0150	— 0,0132
135	— 0,0556	— 0,0575	— 0,0600	— 0,0615
180	— 0,0378	— 0,0392	— 0,0440	— 0,0470

TABLEAU $E_m F_m E_p$

Valeurs de α pour E_m et F_m	Valeur du coefficient K		Valeurs de α pour E_p	Valeur du coef. K E_p
	E_m	F_m		
0	+ 0,0508	+ 0,0455	0	— 0,0060
45	— 0,0058		60	— 0,0910
60		— 0,0091	120	— 0,0575
90	— 0,0014		180	— 0,0410
120		— 0,0400	240	— 0,0435
135	— 0,0058		300	— 0,0240
180	— 0,0036	— 0,0345		

TABLEAU (A B C D)_P

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A _p	B _p	C _p	D _p
3	— 0,0060	— 0,0046	+ 0,0075	— 0,0082
30	— 0,0080	+ 0,0040	+ 0,0170	+ 0,0340
60	— 0,0740	— 0,0920	— 0,0071	— 0,0021
90	— 0,0620	— 0,0620	— 0,0650	— 0,0540
120	— 0,0600	— 0,0575	— 0,0585	— 0,0657
150	— 0,0535	— 0,0570	— 0,0570	— 0,0570
180	— 0,0400	— 0,0410	— 0,0415	— 0,0445
210	— 0,0475	— 0,0440	— 0,0460	— 0,0500
240	— 0,0560	— 0,0430	— 0,0425	— 0,0450
270	— 0,0085	— 0,0102	— 0,0100	— 0,0103
300	— 0,0190	— 0,0240	— 0,0206	— 0,0240
330	— 0,0120	— 0,0130	— 0,0176	— 0,0215

Les quatre premières expériences dont nous venons de relater les résultats par des tableaux et par des courbes, nous ont permis de nous rendre compte dans chaque cas des variations du coefficient K, suivant la position d'un point sur la toiture et suivant l'angle sous lequel cette toiture se présente dans le sens du vent.

La comparaison de ces courbes nous a conduit à chercher l'influence de la façade sur les efforts produits par le vent. Nous avons aussi construit sur les figures 19, 20, 21, 22 et 23 l'influence de cette hauteur sur les points (A B C D)_M et (A B C D)_P.

Sur la figure 19, les premières courbes représentées pour $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 30^\circ$ donnent les variations de K aux points (A B C D)_M. Nous signalerons pour ces courbes deux observations qui s'appliquent à toutes celles représentées sur les figures citées plus haut 19, 20, 21, 22 et 23. D'abord, les courbes représentatives des variations de K, pour les points situés sur le versant de toiture, non soumis à l'action directe du vent, sont sensiblement rectilignes sur la plus grande partie de leur longueur, et que la variation de la valeur de K d'un point à un autre est sensiblement négligeable. D'autre part, pour les points soumis directement à l'action du vent, il y aura aussi la plus grande partie de leur longueur qui affectera une forme rectiligne, et ce n'est que pour les petites hauteurs que nous observerons pour un même point, des variations très rapides de K. Il est cependant exact que chaque point possède une variation très particulière de K dont nous essaierons de tirer un résultat pratique.

Dans la figure 19 pour $\alpha = 0^\circ$, les valeurs de K pour le point D croissent très rapidement d'abord, tendant ensuite vers le maximum par une courbe sensiblement rectiligne. Pour les points A, B et C les valeurs de K tendraient vers le même point, mais plus lentement et plus régulièrement.

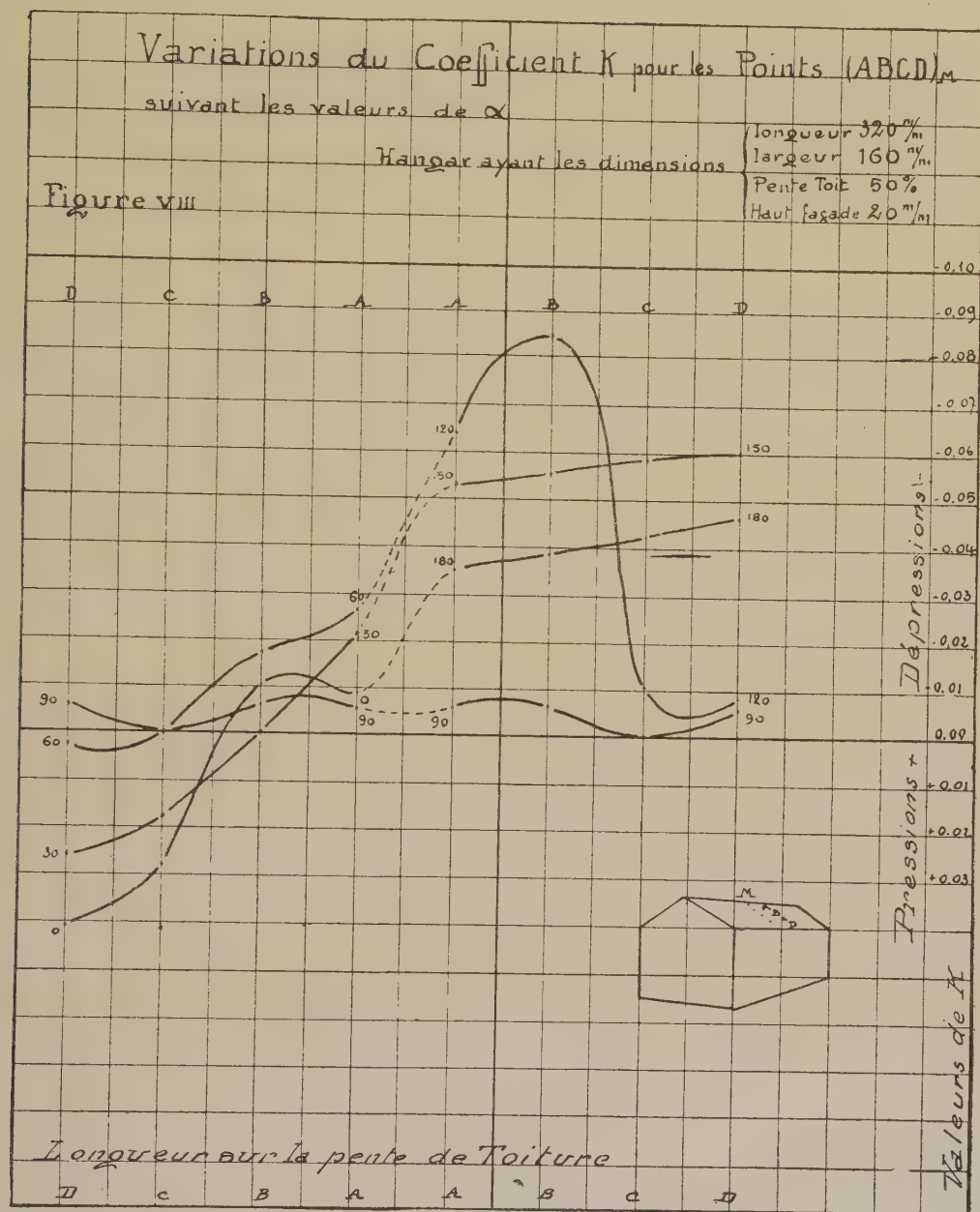
Pour $\alpha = 30^\circ$, les points C et D atteignent une valeur comprise entre — 0,0600 et — 0,0800 sans qu'on puisse dire qu'un maximum ait été atteint, étant donnée la forme et l'allure des courbes. Dans les mêmes conditions, les points A et B varient très peu.

Sur la figure 20 pour $\alpha = 60^\circ$, nous voyons le peu d'importance du coefficient K pour le versant soumis au vent. Au contraire, pour les petites hauteurs, les courbes des points de l'autre versant prennent chacune une allure particulière.

Enfin, pour $\alpha = 90^\circ$, toutes les courbes se trouvent sensiblement confondues et affectent pour les grandes hauteurs une allure presque rectiligne.

Pour $\alpha = 60^\circ$, nous voyons le maximum de K atteint sur le versant non

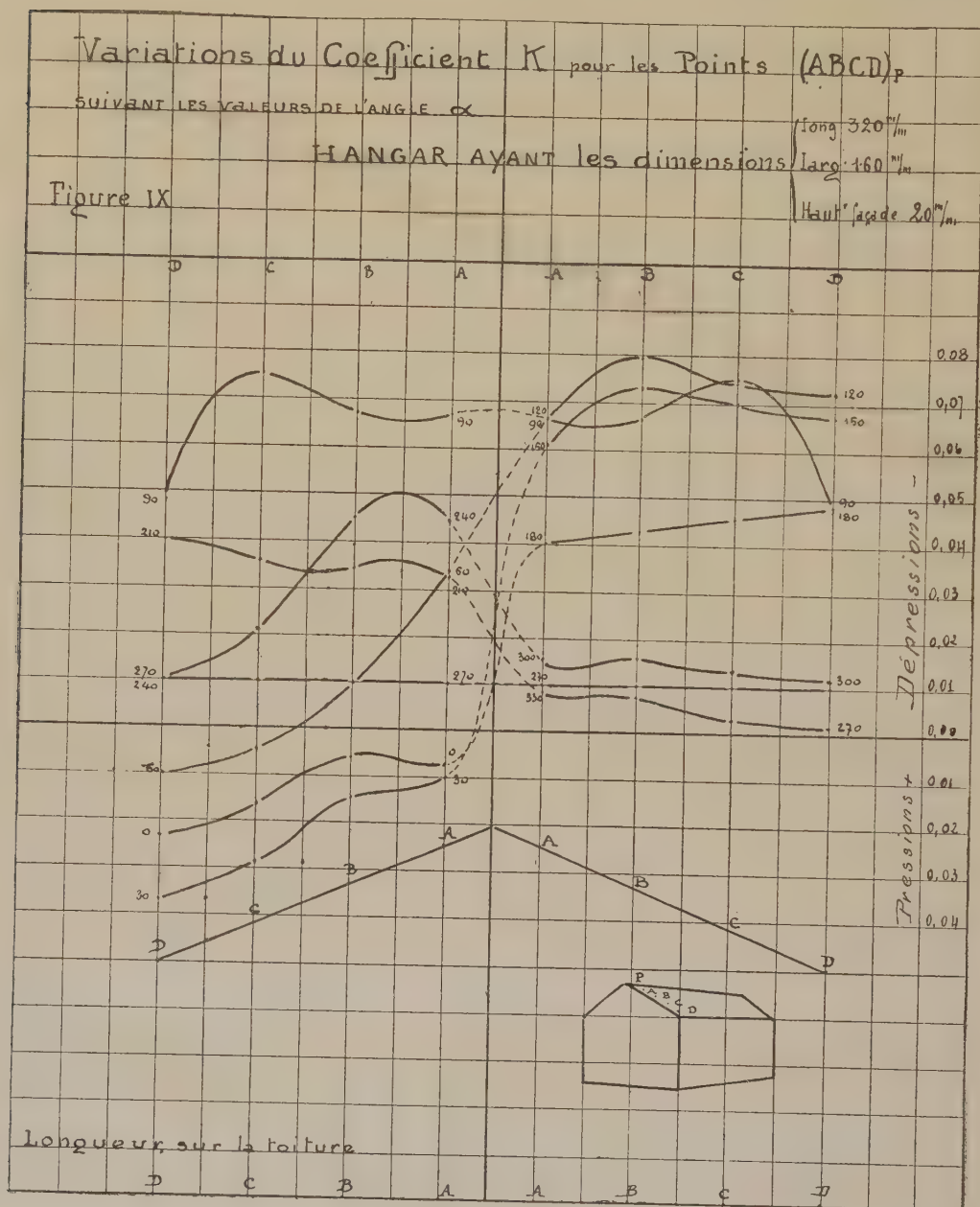
exposé au vent avec $K = 0,0700$, alors que pour $\alpha = 90^\circ$, la courbe rectiligne correspond à environ $K = 0,0600$.



Dans la figure 20 les courbes sur le versant non exposé au vent gardent chacune une valeur sensiblement constante et qui varie de l'une à l'autre de $-0,0400$ à $-0,0600$.

Nous faisons remarquer que tous les points situés sur la ligne (A B C D)_M se trouveront en même temps affectés d'un coefficient $K = -0,0600$ pour $\alpha = 90^\circ$,

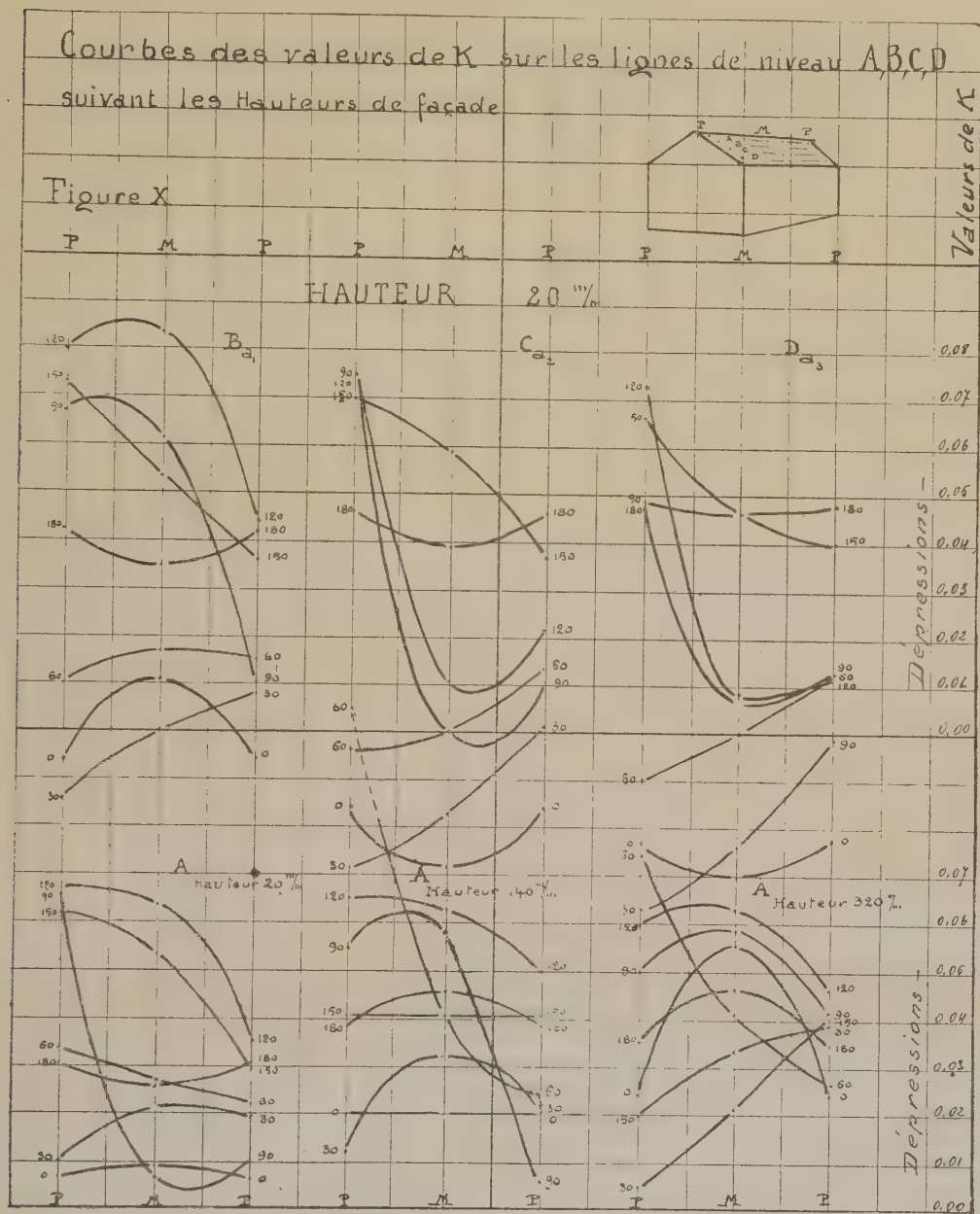
et que pour $\alpha = 0^\circ$, nous trouverons pour les points B C D une valeur commune $K = -0,0750$. Enfin, pour $\alpha = 30^\circ$, les points C et D seulement atteindront $-0,0750$.



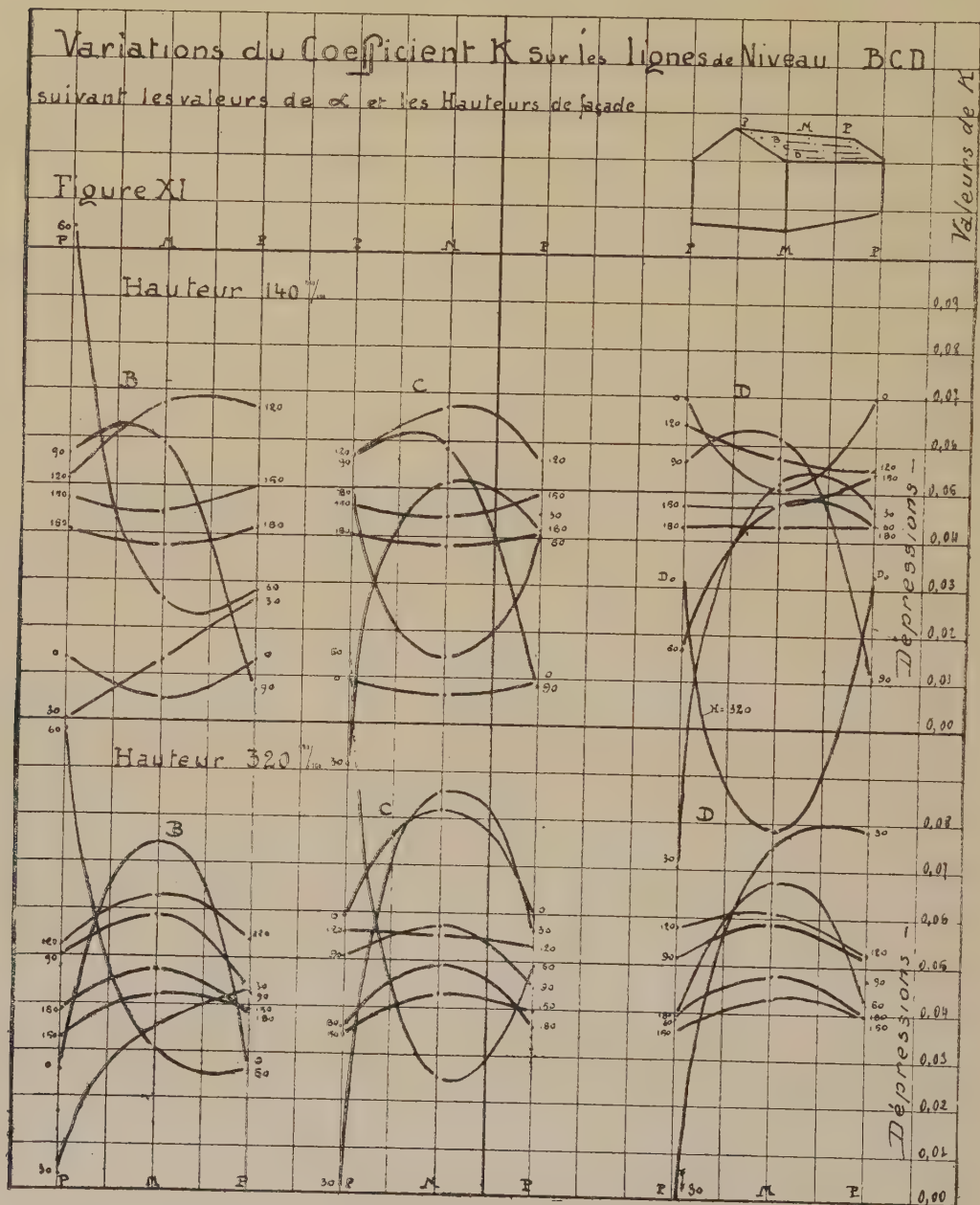
Comme ce maximum maximorum $K = 0,0750$ affecte sensiblement toute la ligne des M, sauf dans la partie du sommet de la toiture, il est possible d'admettre que le coefficient K pourrait être affecté d'une valeur uniforme dans les calculs de toiture et que cette valeur serait voisine de $K = -0,0750$.

On se rapprocherait alors très sensiblement des efforts réels existants sur la ligne médiane de toiture, par un vent de 40 mètres/secondes.

D'ailleurs, cette valeur de K étant atteinte pour plusieurs points à la fois — trois sur quatre $B C D$ — (le point A ne semblant jamais devoir être affecté d'un



Sur les figures 21, 22 et 23, sont représentées les variations du coefficient K sur la ligne de toiture à l'aplomb du pignon.



Nous pourrions faire pour ces points les mêmes remarques générales que celles faites au sujet des points médians. Les courbes de variation pour les points situés sur le versant non soumis au vent seront dans la plus grande partie de leur longueur sensiblement représentées par la même ligne rectiligne, le plus souvent horizontale.

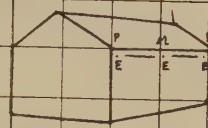
Les courbes de variation de K pour les points situés sur le versant non soumis au vent sont sensiblement rectilignes pour les grandes hauteurs.

Pour $\alpha = 0^\circ$, seule la courbe des D atteint des valeurs très grandes et allant jusqu'à $K = -0,1320$.

Variations du Coefficient K sur les lignes de Niveau D

suivant les valeurs de α et les hauteurs de façade

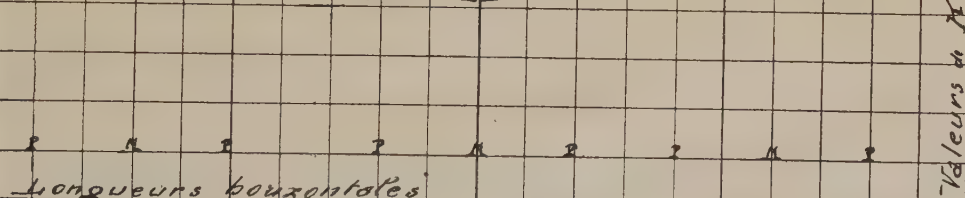
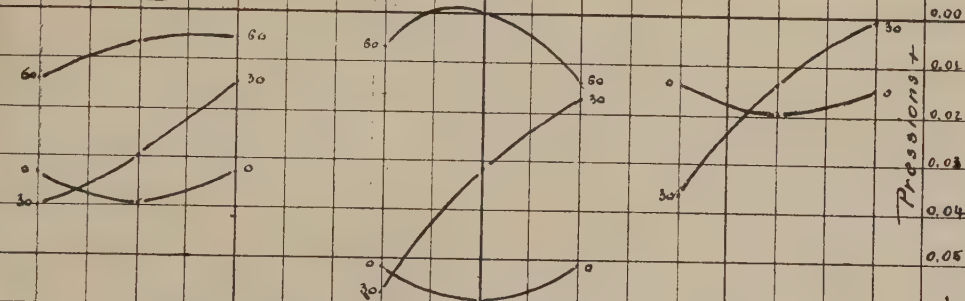
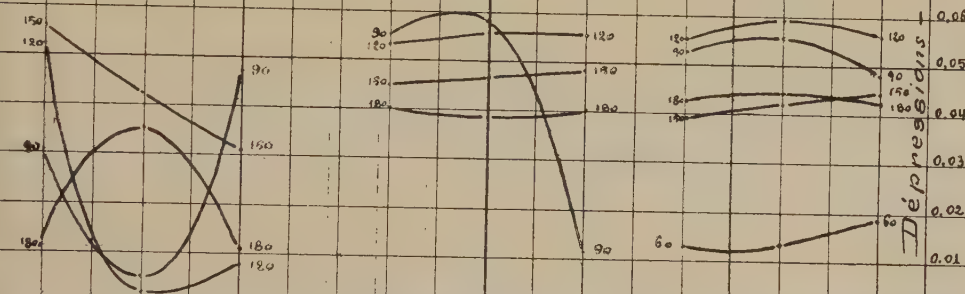
Figure XII



Hauteur 20 m

Hauteur 140 m

Hauteur 320 m

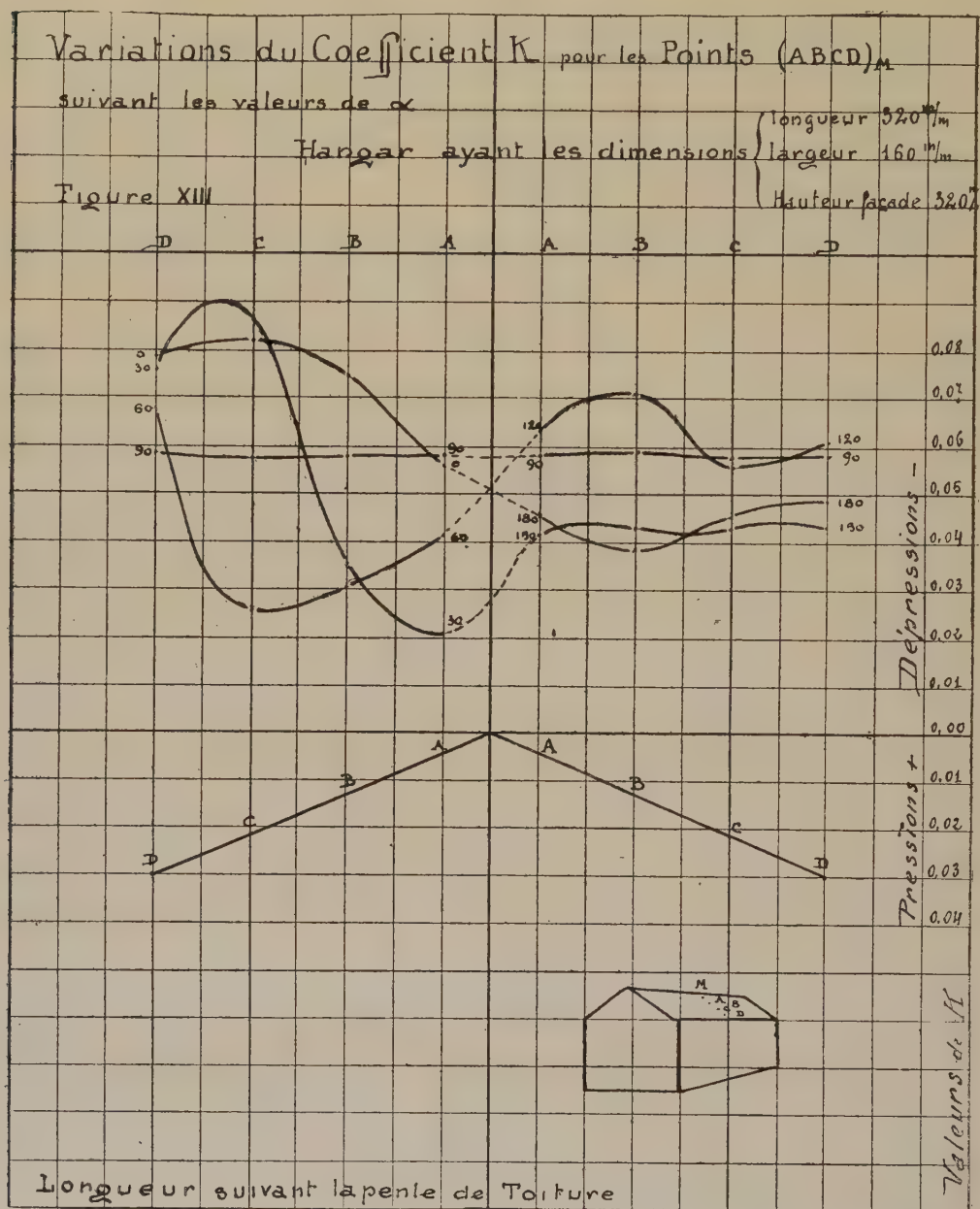


Pour $\alpha = 30^\circ$, les courbes des points sur le versant arrière sont très nettement au-dessus de celles représentant les variations sur le versant avant.

Pour $\alpha = 60^\circ$, nous trouvons un maximum pour les points A et B ou K atteint $-0,1040$ et $-0,1060$.

Enfin, pour $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 210^\circ$, $\alpha = 240^\circ$, $\alpha = 270^\circ$, $\alpha = 300^\circ$, $\alpha = 330^\circ$,

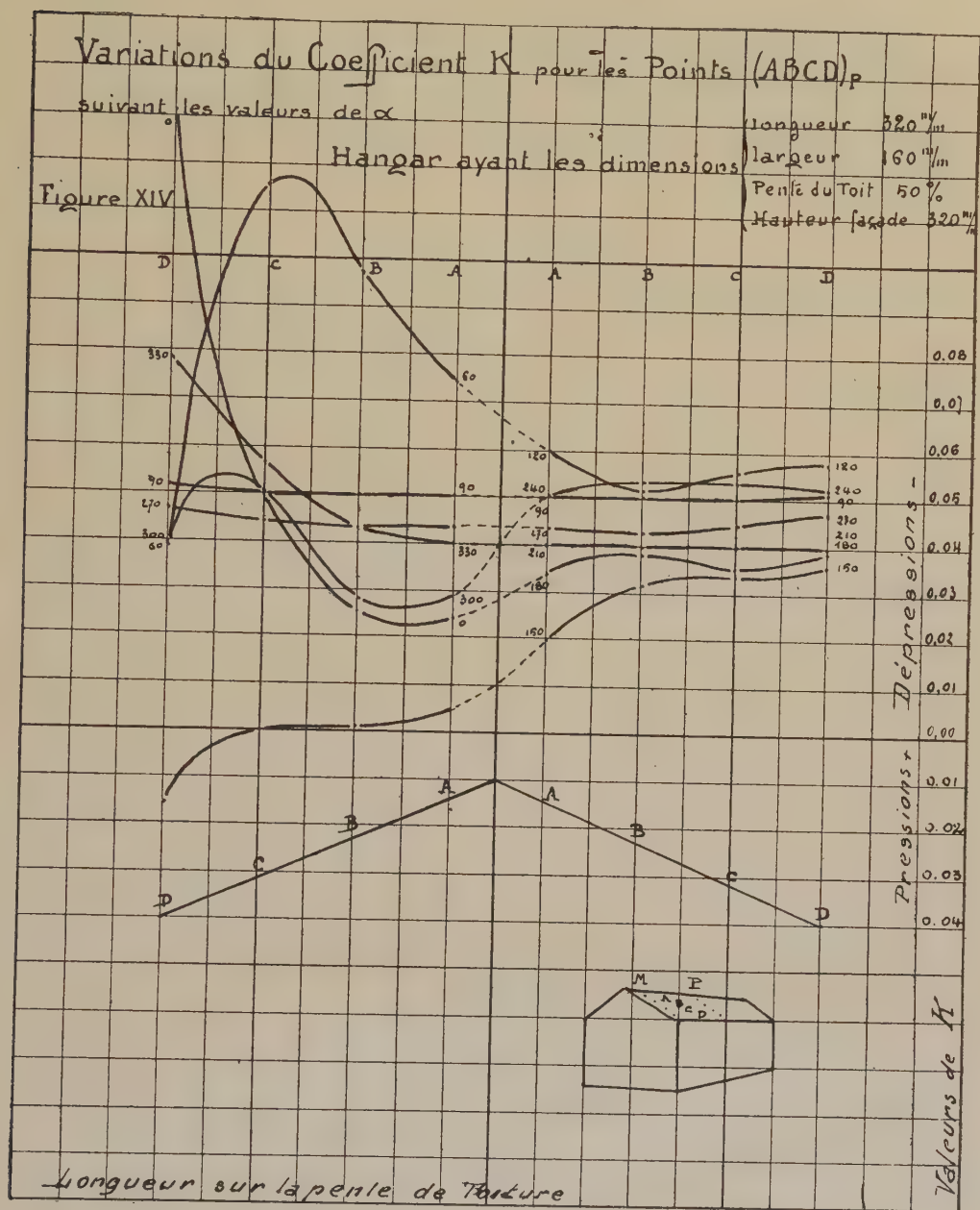
les courbes sont assez ramassées et ne dépassent jamais la valeur de K dont nous avons parlé précédemment $K = -0,0750$.



Les valeurs positives du coefficient K ne sont obtenues que pour les faibles hauteurs, sauf dans le cas de $\alpha = 30^\circ$ où les points C et D sont toujours affectés d'un coefficient positif.

La courbe des D qui est très sensiblement rectiligne et presque horizontale puisqu'elle représente une variation de K comprise entre $+0,0250$ et $+0,0350$ donne une valeur moyenne de $+0,0300$.

Les points A et B pour une faible valeur de la hauteur sont aussi affectés d'un coefficient positif.



Nous avons essayé dans une cinquième expérience de savoir ce qui se produit quand on interpose sur le bord du toit un obstacle à la montée du courant d'air frappant la paroi verticale, et produisant dans les expériences précédentes une succion sur la toiture.

Nous décrirons cette expérience immédiatement, de façon à en appliquer les résultats à l'influence de la hauteur.

Pour faire cette expérience, nous avons fixé sur le bord du toit une lame d'aluminium mince disposée comme il est indiqué sur la figure 13, jouant en somme le rôle d'une corniche dans un bâtiment ou d'un auvent dans un hangar.

Nous nous sommes servis du hangar utilisé dans les expériences précédentes et nous avons adopté la hauteur $H = 140$ m/m.

Nous avons observé les points (A B C D)_M dans les mêmes conditions que pour les lectures faites ci-dessus. Agissant ainsi, nous avons pu déterminer les résultats indiqués sur le tableau ci-après.

TABLEAU (A B C D)_M

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0188	— 0,0036	+ 0,0092	+ 0,0105
30	— 0,0240	— 0,0026	— 0,0100	— 0,0310
60	— 0,0432	— 0,0260	— 0,0143	— 0,0085
90	— 0,0590	— 0,0576	— 0,0555	— 0,0520
150	— 0,0496	— 0,0516	— 0,0510	— 0,0510

Nous avons représenté les courbes de variation sur la figure 24. Nous observons que les valeurs du point D sont nettement différentes de celles trouvées précédemment, et croissent jusqu'à atteindre des valeurs positives.

Si les points A et B restent sensiblement avec le même coefficient que dans les premières expériences, nous observons encore le relèvement des courbes pour C et D comme dans les premières figures, mais infiniment moins accentué. Il est à supposer que dans le cas d'un auvent très important, les courbes tendraient à prendre pour $\alpha = 0^\circ$, une allure plus rectiligne. Pour les autres valeurs de α , il est difficile de préciser, d'autres considérations pouvant influencer sur le résultat.

Les points A et B restant invariables avec un auvent suivront très vraisemblablement les variations qui ont été indiquées pour l'influence de la hauteur, tandis que les points C et surtout les points D tendront vers un coefficient plus élevé et plus indépendant des dimensions de la façade.

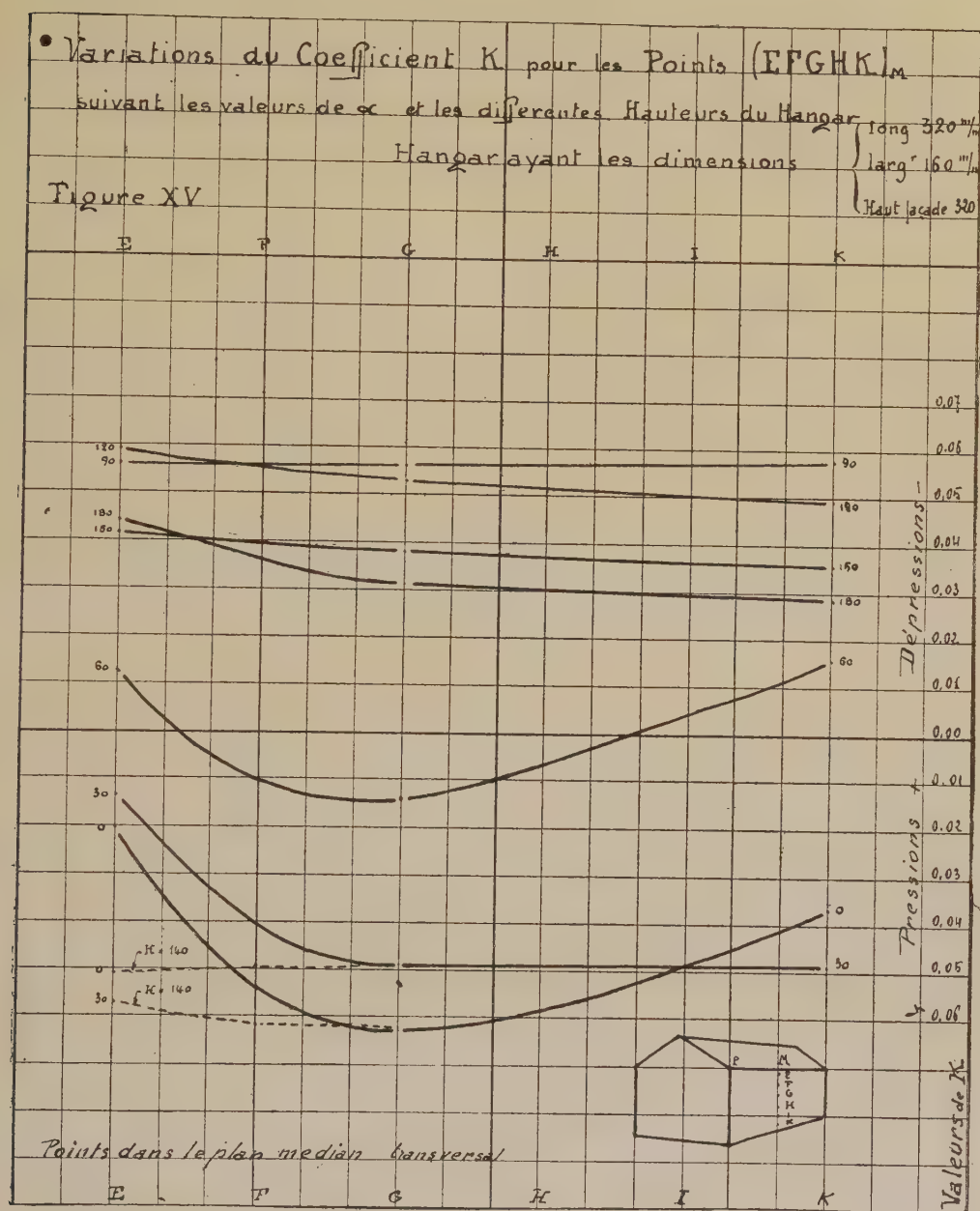
Les parties supérieures de la toiture ne subissant pas l'influence d'un auvent, il serait utile de maintenir dans les calculs un coefficient de — 0,0750, il est en effet assez difficile d'examiner tous les systèmes de corniche et toutes les dimensions d'auvent en usage dans la pratique. Ceci conduirait à une étude très complexe qui ne donnerait en somme que des modifications pour les coefficients dont doivent être affectés les points en bordure de toiture.

Nous pensons que ces résultats seraient assez peu intéressants et entraîneraient dans les calculs de charpente des difficultés hors de proportion avec les économies possibles à réaliser.

Nous étudierons ultérieurement le résultat pratique à tirer de ce chapitre. Faisons remarquer seulement que le coefficient moyen trouvé correspondait à une force d'environ 110 kgs.

Quant à la force de pression éventuelle, elle ne dépasse guère 50 kgs.

Il nous reste pour terminer l'étude de ces cinq premières expériences, à examiner les efforts agissant sur les façades et pignons.



Nous avons vu sur les figures 15, 16, 17, 18 que les courbes représentatives des valeurs de K étaient presque rectilignes sur une assez grande longueur, et le plus souvent horizontales. Il n'y a donc pas beaucoup de variation du coefficient K sur une paroi verticale, sauf à la partie supérieure de celle-ci où il y a diminution rapide de la valeur des efforts.

Enfin, il semble que la valeur normale du coefficient K à adopter généralement, serait $K = + 0,0625$ pour les pressions.

Nous remarquerons encore au sujet de ces premières expériences que la hauteur de façade, dont nous avons constamment parlé, n'est à proprement dire que le rapport entre la hauteur de façade et la largeur du hangar, cette dernière dimension ayant été fixée et restant constante, nous avons le droit de n'envisager que la hauteur, la largeur pouvant éventuellement être prise pour unité ou pour un coefficient constant.

Cela ne présente d'ailleurs aucun intérêt dans la pratique, mais le seul fait du rapport est intéressant à retenir.

CHAPITRE X

Influence de l'inclinaison de la toiture sur les efforts dus au vent

La sixième expérience que nous avons réalisée a porté sur la recherche de l'influence de l'angle d'une toiture sur les efforts supportés par celle-ci sous l'action du vent.

Nous avons donné plus haut les dispositifs employés pour ces expériences, ainsi que les différents angles de toiture pour lesquelles des observations ont été faites.

Nous allons donner ci-dessous les différents résultats que nous avons obtenus en observant les points du hangar situés dans le plan médian transversal, points qui nous ont seuls servi pour nos lectures.

Nous rappellerons que nous avons utilisé pour la toiture à 50 % les résultats déjà acquis précédemment et dont nous reprendrons cependant le tableau, de façon à avoir une suite complète de résultats.

TABLEAU (A B C D)_M
Pour $\gamma = 0$ Toiture terrasse

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0570	— 0,0565	— 0,0580	— 0,0545
30	— 0,0610	— 0,0658	— 0,0630	— 0,0633
60	— 0,0160	— 0,0149	— 0,0770	— 0,0765
90	— 0,0158	— 0,0139	— 0,0115	— 0,0116
120	— 0,0208	— 0,0200	— 0,0287	— 0,0308
150	— 0,0710	— 0,0635	— 0,0540	— 0,0428
180	— 0,0585	— 0,0561	— 0,0550	— 0,0600

TABLEAU (A B C D)_M
Pour $\gamma = 8^{\circ}30$ Toiture à 15 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0725	— 0,0905	— 0,1000	— 0,0972
30	— 0,0790	— 0,0845	— 0,0865	— 0,0868
60	— 0,0420	— 0,0325	— 0,0925	— 0,0840
90	— 0,0171	— 0,0178	— 0,0167	— 0,0165
120	— 0,0675	— 0,0400	— 0,0320	— 0,0260
150	— 0,0625	— 0,0578	— 0,0475	— 0,0370
180	— 0,0500	— 0,0443	— 0,0376	— 0,0210

TABLEAU (A B C D)_MPour $\gamma = 16^\circ 40$ Toiture à 30 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0266	— 0,0364	— 0,0700	— 0,0930
30	— 0,0520	— 0,0700	— 0,0840	— 0,0840
60	— 0,0396	— 0,0227	— 0,0595	— 0,0640
90	— 0,0222	— 0,0207	— 0,0220	— 0,0262
120	— 0,0825	— 0,0382	— 0,0380	— 0,0400
150	— 0,0484	— 0,0610	— 0,0552	— 0,0520
180	— 0,0385	— 0,0540	— 0,0255	— 0,0315

TABLEAU (A B C D)_MPour $\gamma = 26^\circ 30$ Toiture à 50 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0150	+ 0,0000	+ 0,0048	— 0,0146
30	— 0,0330	— 0,0125	— 0,0440	— 0,0440
60	— 0,0330	— 0,0225	— 0,0130	— 0,0420
90	— 0,0295	— 0,0275	— 0,0285	— 0,0310
120	— 0,0630	— 0,0530	— 0,0535	— 0,0575
150	— 0,0460	— 0,0440	— 0,0470	— 0,0485
180	— 0,0375	— 0,0380	— 0,0410	— 0,0435

TABLEAU (A B C D)_MPour $\gamma = 40^\circ$ Toiture à 85 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0086	+ 0,0092	+ 0,0196	+ 0,0178
30	— 0,0140	+ 0,0024	+ 0,0079	— 0,0115
60	— 0,0288	— 0,0160	— 0,0080	— 0,0325
90	— 0,0142	— 0,0141	— 0,0153	— 0,0172
120	— 0,0615	— 0,0635	— 0,0604	— 0,0775
150	— 0,0462	— 0,0480	— 0,0505	— 0,0455
180	— 0,0370	— 0,0370	— 0,0368	— 0,0246

TABLEAU (A B C D)_MPour $\gamma = 60^\circ$ Toiture 175 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	+ 0,0120	+ 0,0320	+ 0,0422	+ 0,0495
30	+ 0,0012	+ 0,0205	+ 0,0308	+ 0,0375
60	— 0,0220	— 0,0080	+ 0,0006	+ 0,0030
90	— 0,0127	— 0,0024	— 0,0030	— 0,0108
120	— 0,0695	— 0,0700	— 0,0720	— 0,0715
150	— 0,0488	— 0,0488	— 0,0476	— 0,0490
180	— 0,0350	— 0,0368	— 0,0385	— 0,0375

TABLEAU (E F G)_MPour $\gamma = 0$ Toiture terrasse

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0606	+ 0,0596	+ 0,0455
30	+ 0,0480	+ 0,0532	+ 0,0468
60	+ 0,0056	+ 0,0155	+ 0,0154
90	— 0,0091	— 0,0096	— 0,0067
120	— 0,0395	— 0,0370	— 0,0245
150	— 0,0335	— 0,0335	— 0,0338
180	— 0,0300	— 0,0322	— 0,0278

TABLEAU (E F G)_MPour $\gamma = 80^\circ 30'$ Toiture à 15°

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0532	+ 0,0575	+ 0,0434
30	+ 0,0390	+ 0,0472	+ 0,0395
60	+ 0,00243	+ 0,0111	+ 0,0122
90	— 0,0170	— 0,0194	— 0,0153
120	— 0,0294	— 0,0536	— 0,0268
150	— 0,0293	— 0,0410	— 0,0300
180	— 0,0217	— 0,0236	— 0,0268

TABLEAU (E F G)_MPour $\gamma = 16^\circ 40$ Toiture à 30 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0566	+ 0,0580	+ 0,0454
30	+ 0,0407	+ 0,0478	+ 0,0398
60	+ 0,0030	+ 0,0122	+ 0,0122
90	— 0,0267	— 0,0283	— 0,0244
120	— 0,0318	— 0,0540	— 0,0298
150	— 0,0441	— 0,0490	— 0,0425
180	— 0,0285	— 0,0302	— 0,0293

TABLEAU (E F G)_MPour $\gamma = 26^\circ 30$ Toiture à 50 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0585	+ 0,0586	+ 0,0570
30	+ 0,0460	+ 0,0490	+ 0,0460
60	+ 0,0040	+ 0,0031	+ 0,0052
90	— 0,0340	— 0,0370	— 0,0315
120	— 0,0525	— 0,0536	— 0,0520
150	— 0,0470	— 0,0475	— 0,0480
180	— 0,0382	— 0,0378	— 0,0360

TABLEAU (E F G)_MPour $\gamma = 40^\circ$ Toiture à 85 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0625	+ 0,0560	+ 0,0485
30	+ 0,0510	+ 0,0535	+ 0,0510
60	+ 0,0097	+ 0,0145	+ 0,0160
90	— 0,0245	— 0,0270	— 0,0245
120	— 0,0562	— 0,0680	— 0,0390
150	— 0,0400	— 0,0485	— 0,0485
180	— 0,0327	— 0,0355	— 0,0365

TABLEAU (E F G)_MPour $\gamma = 60^\circ$ Toiture à 175 %

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0625	+ 0,0530	+ 0,0550
30	+ 0,0550	+ 0,0572	+ 0,0555
60	+ 0,0135	+ 0,0158	+ 0,0178
90	— 0,0129	— 0,0159	— 0,0126
120	— 0,0600	— 0,0720	— 0,0550
150	— 0,0430	— 0,0475	— 0,0460
180	— 0,0326	— 0,0352	— 0,0370

En examinant la figure 25 qui représente les variations des valeurs du coefficient K aux points (A B C D)_{M-0} et (A B C D)_{M-180}, quand l'angle γ d'inclinaison de la toiture augmente, nous trouvons un maximum de dépression, pour une valeur de l'angle de la toiture correspondant à $\gamma = 10^\circ$. Ce maximum de succion étant atteint, les courbes représentatives de K ne cessent de prendre des valeurs croissantes.

Il est à remarquer que l'observation que nous avons faite plus haut relativement aux plans placés dans un courant d'air sous un angle voisin de 30° se trouve vérifiée dans ces courbes. En effet, pour cette valeur de γ , le coefficient K oscille nettement autour de 0,0000.

Nous remarquerons que les courbes représentatives des efforts sur le versant versant non soumis à l'action directe du vent, restent très sensiblement constantes avec une valeur moyenne de 0,0400. Cependant, au-dessous de 20° cette continuité disparaît et nous observons de grandes perturbations dans les courbes, la valeur moyenne restant pourtant voisine du coefficient indiqué plus haut — 0,0400. Ces perturbations disparaissent pour $\gamma = 0^\circ$, c'est-à-dire pour la toiture terrasse où toutes les courbes se rejoignent en un point très voisin de — 0,0550.

D'autre part, nous voyons entre $\gamma = 0^\circ$ et $\gamma = 20^\circ$, la toiture soumise, sur le versant exposé au vent, à des dépressions considérables.

Sur la figure 26 qui représente les variations du coefficient K pour les différentes valeurs de γ et les points (A B C D)_{M-30} et (A B C D)_{M-150}, nous ferons les mêmes remarques que pour la figure 25.

Seulement, le maximum des dépressions pour γ voisin de 10° au lieu d'avoir une valeur de K = 0,1050 se trouve dans les environs de K = 0,0900. De même, les valeurs positives de K ont diminué.

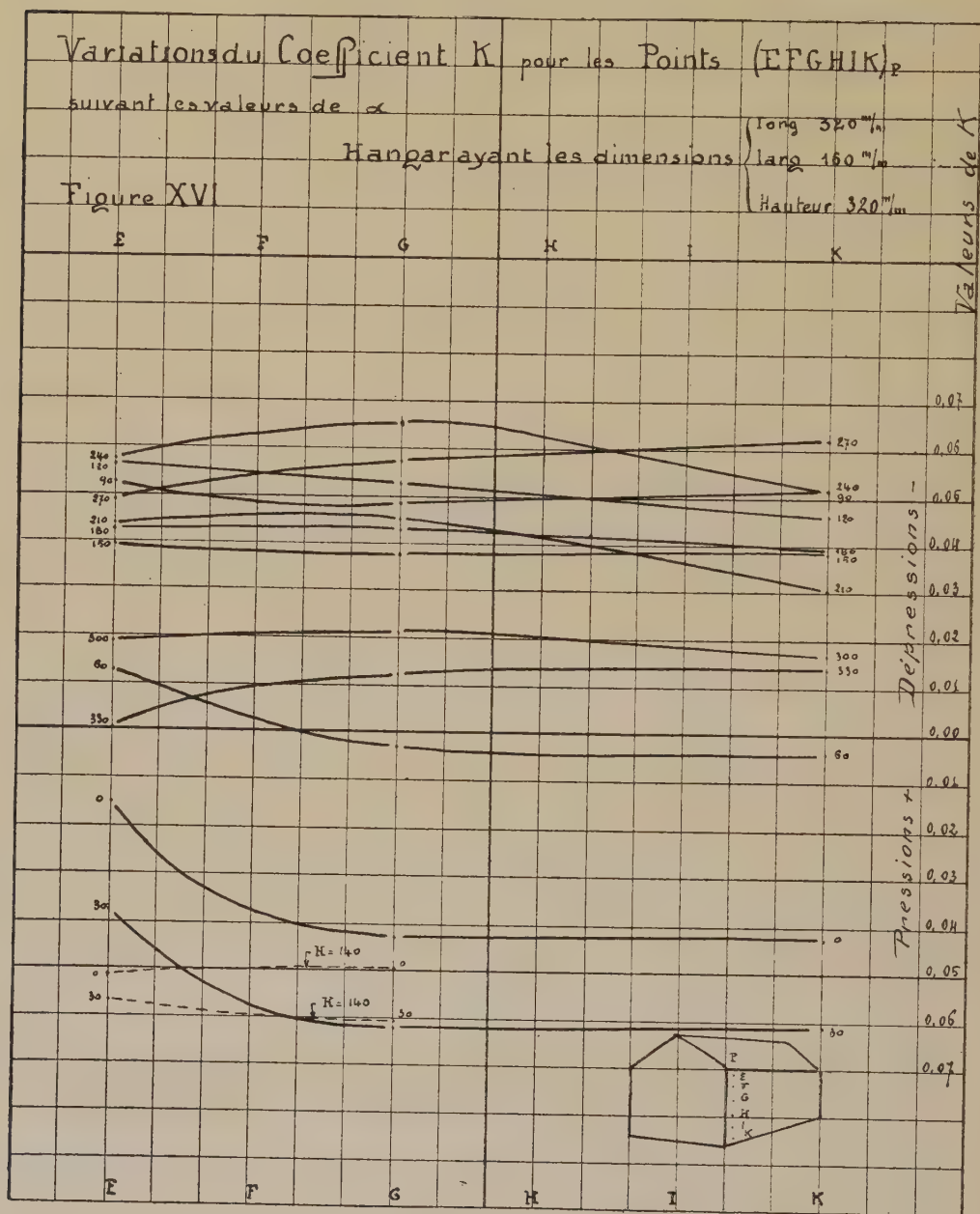
Nous remarquerons que les courbes représentatives des efforts sur le versant non soumis au vent montrent qu'il n'existe que des dépressions, dont les valeurs de coefficient sont légèrement croissantes.

Sur la figure 27, nous retrouvons les mêmes éléments que pour les deux figures précédentes avec les points (A B C D)_{M-60}, (A B C D)_{M-120} et (A B C D)_{M-90}.

Sur le schéma I (A B C D)_{M-60}, nous retrouvons les courbes des points soumis à l'action directe du vent qui avec γ compris entre 20° et 60° tendent maintenant vers une direction générale horizontale. Le maximum des dépressions se trouve toujours situé dans les environs de $\gamma = 10^\circ$ et reste alors voisin de — 0,0900. Enfin, les dépressions sur le versant non soumis au vent s'accroissent considérablement et atteignent K = — 0,0700 et — 0,0800 pour un angle de 40° à 45° .

Sur les figures 28, 29 et 30, sont représentées dans chaque direction du han-

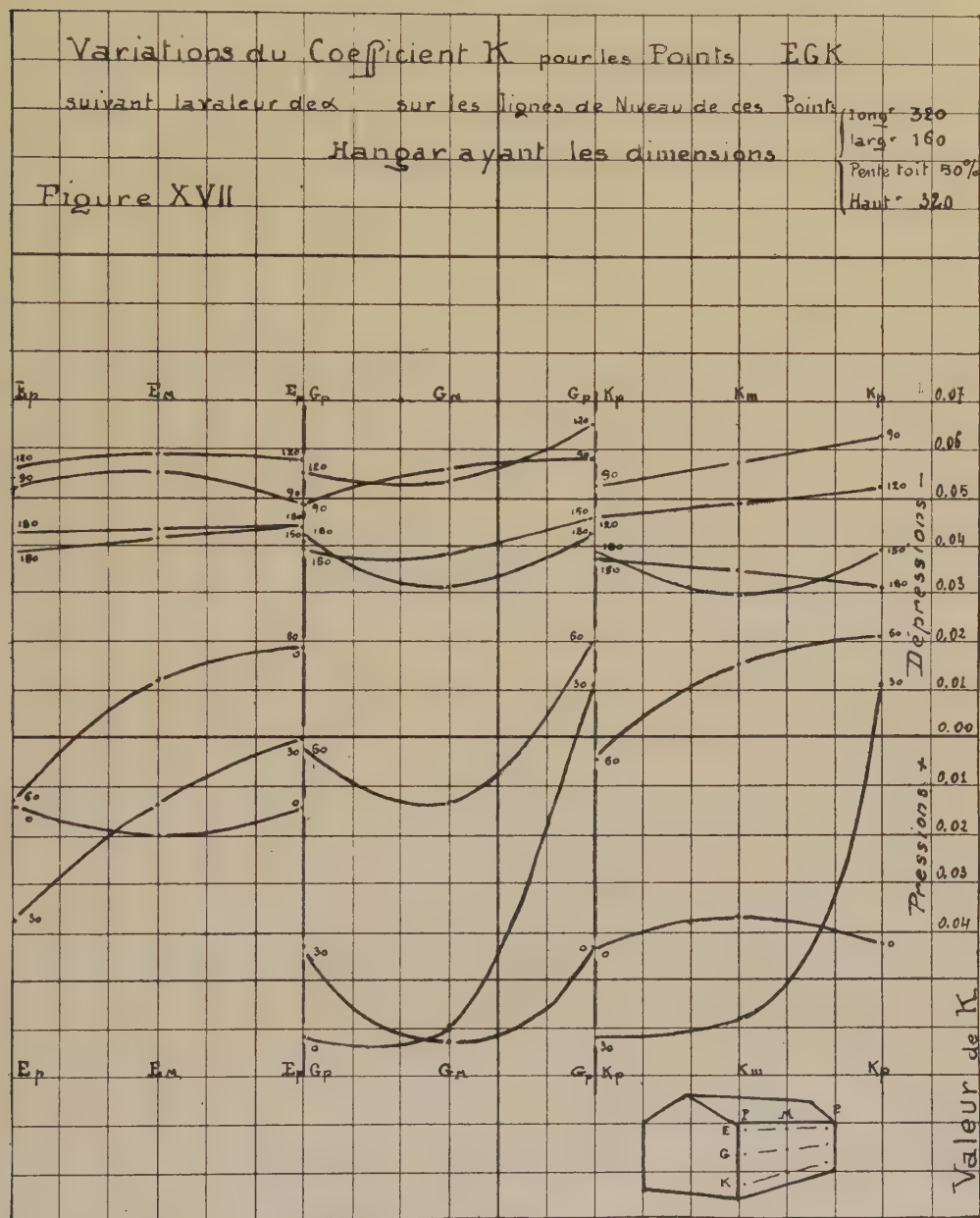
gar, les valeurs que prend le coefficient K pour chaque angle d'expérience de la toiture.



Pour la toiture terrasse avec $\alpha = 0^\circ$, la dépression tout le long de la toiture est continue et reste voisine de $-0,0600$. Pour $\alpha = 30^\circ$, nous retrouvons la même valeur du coefficient, pour $\alpha = 60^\circ$, à l'aplomb de la façade, nous trouvons une succion légèrement supérieure $K = -0,0700$. Enfin, pour $\alpha = 90^\circ$, la valeur moyenne de K tombe à $-0,0150$.

Cette diminution de l'aspiration pour $\alpha = 90^\circ$, est générale quelle que soit la

valeur de γ . Nous avons représenté figure 30 les courbes des valeurs de K , dans le cas du hangar des premières expériences, qui n'avait que 30 centimètres de lon-



gueur. Nous voyons que la valeur du coefficient est alors voisine de — 0,0600. Nous étudierons ultérieurement les causes probables de cette différence.

Nous retrouvons sur les figures 28, 29 et 30 tout ce que nous avons dit pour les figures 25, 26 et 27. D'abord, les fortes valeurs des dépressions dans le cas des toitures à faibles pentes, ont toujours lieu pour une valeur de γ voisine de 10°.

Ensuite, les valeurs de K pour le versant non exposé au vent sont toujours très tourmentées quand γ est inférieur à 20° .

Sur la figure 31, sont représentées les courbes des variations des valeurs de K pour le point E suivant les valeurs croissantes de l'angle γ . Ces variations sont assez difficiles à définir. Sans être complètement horizontales, ces courbes ont une allure générale tendant vers cette direction.

Il semblerait donc que l'inclinaison de la toiture n'a qu'une faible influence sur les efforts du vent agissant sur les parois. Il en sera de même pour les points F G qui donneraient lieu aux mêmes observations. Nous n'avons représenté sur la figure 31 pour $\alpha = 0^\circ$ que les courbes de E. Celles des F et des G seraient sensiblement analogues.

CHAPITRE XI

Hangar parabolique

La dernière expérience a porté sur l'étude des toitures paraboliques ayant une flèche correspondant à $1/5$ de la portée.

Les résultats trouvés ont été indiqués dans les deux tableaux ci-après :

TABLEAU (A B C D)_M
Hangar parabolique

Valeur de α	Valeur du coefficient K			
	A	B	C	D
0	— 0,0850	— 0,0890	— 0,0705	— 0,0442
30	— 0,1150	— 0,0980	— 0,0710	— 0,0580
60	— 0,0715	— 0,0500	— 0,0385	— 0,0295
90	— 0,0555	— 0,0555	— 0,0542	— 0,0550
120	— 0,0735	— 0,0735	— 0,0690	— 0,0620
150	— 0,0890	— 0,0565	— 0,0450	— 0,0440
180	— 0,0322	— 0,0275	— 0,0270	— 0,0305

TABLEAU (E F G)_M
Hangar parabolique

Valeur de α	Valeur du coefficient K		
	E	F	G
0	+ 0,0570	+ 0,0592	+ 0,0422
30	+ 0,0360	+ 0,0510	+ 0,0482
60	+ 0,0030	+ 0,0103	+ 0,0120
90	— 0,0405	— 0,0418	— 0,0368
120	— 0,0542	— 0,0585	— 0,0540
150	— 0,0428	— 0,0485	— 0,0452
180	— 0,0257	— 0,0285	— 0,0263

L'examen de la figure 32 où sont données les courbes représentatives des différentes valeurs de K, sur la ligne médiane de toiture, suivant les différentes orientations du hangar, montre une certaine analogie avec les résultats trouvés sur les cylindres complets dans la zone soumise au vent tangent à celui-ci.

Le maximum des dépressions se trouve du côté soumis au vent et entre les points A et B. Ce maximum est atteint par $K = -0,1150$ avec $\alpha = 30^\circ$.

Sur le versant non soumis au vent, la valeur de la dépression est sensiblement constante pour une même valeur de α . Pour $\alpha = 30^\circ$, $K = 0,0300$; pour $\alpha = 60^\circ$, $K = -0,0750$. Enfin pour $\alpha = 90^\circ$, nous retrouvons avec la valeur $K = -0,0550$, la valeur correspondante des hangars des premières expériences dont la longueur est de 32 cm.

Nous n'avons pas représenté par des courbes les variations des points (E F G)_M, le simple examen du tableau suffit à montrer la similitude entre les coefficients trouvés dans ce cas et ceux trouvés pour les hangars des premières expériences, dont les dimensions sont sensiblement semblables. Il n'y aura comme différence que les valeurs de K pour $\alpha = 90^\circ$; nous étudierons plus tard ce résultat.

CHAPITRE XII

Conclusions

Les expériences précédentes nous ont montré les différentes variations du coefficient K , quand on fait varier les éléments d'un hangar.

Les variables qui sont à considérer sont au nombre de cinq :

Hauteur de façade ; longueur ; largeur ; direction dans le sens du vent ; angle de la toiture.

L'étude que nous nous sommes proposés devant avoir un but pratique, nous ferons les observations suivantes pour rechercher les résultats à employer.

I. — Un bâtiment pouvant dans le cas le plus général être soumis à toutes les directions du vent, et il nous suffira de connaître quelle est la plus défavorable.

II. — Les quantités : hauteur, largeur, longueur et inclinaison de la toiture étant connues dans un bâtiment, le calcul de chacun de ces éléments se fera avec les charges maximum de pression ou de succion, agissant sur les surfaces de toiture, de façade et de pignon.

Dans ces conditions, ce qu'il est utile de connaître, ce sont les valeurs maxima moyennes des efforts agissant sur les surfaces soit en dépression, soit en pression.

A ce sujet, il est à remarquer que les points placés sur la toiture, près des surfaces verticales, peuvent être soumis à des dépressions considérables du fait de l'angle de ces surfaces. Nous avons vu l'influence d'une corniche ou d'un auvent. Il y a donc lieu d'éliminer certains maxima qui ne sont que des accidents et qui dans la pratique se trouvent presque toujours détruits soit par des moulures, soit par tout autre motif architectural, et même encore, comme c'est le cas le plus fréquent, par la toiture elle-même, dépassant les murs du bâtiment.

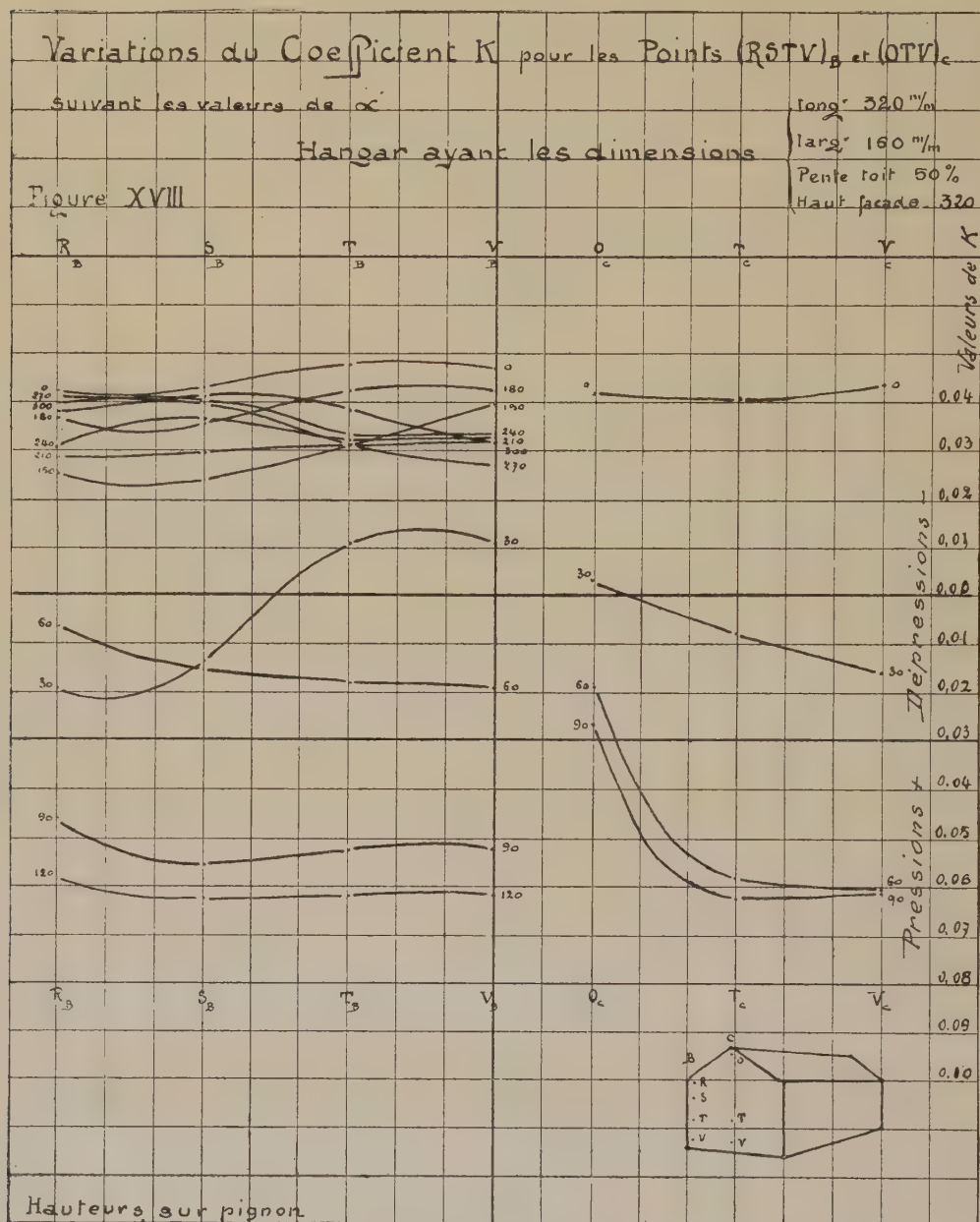
Nous chercherons ainsi à connaître la valeur maximum du coefficient K sur les lignes horizontales des A, des B, des C et des D. Il sera facile, avec les figures qui ont été faites ci-dessus, de déterminer quel est l'angle α pour lequel se produit ce maximum, et la valeur de celui-ci.

Nous aurons à examiner si ce maximum se produit à la fois sur plusieurs lignes horizontales de la toiture.

Si ces conditions étaient remplies, il serait judicieux d'admettre que la valeur maximum de K ainsi trouvée devra être appliquée dans les calculs pour assurer la stabilité d'une toiture.

Nous avons admis dans nos expériences, un vent de quarante mètres/secondes, le coefficient trouvé, étant, comme nous l'avons montré, complètement indépendant de la vitesse du vent ; il s'en suit que les résultats trouvés peuvent s'appliquer quelle que soit cette vitesse.

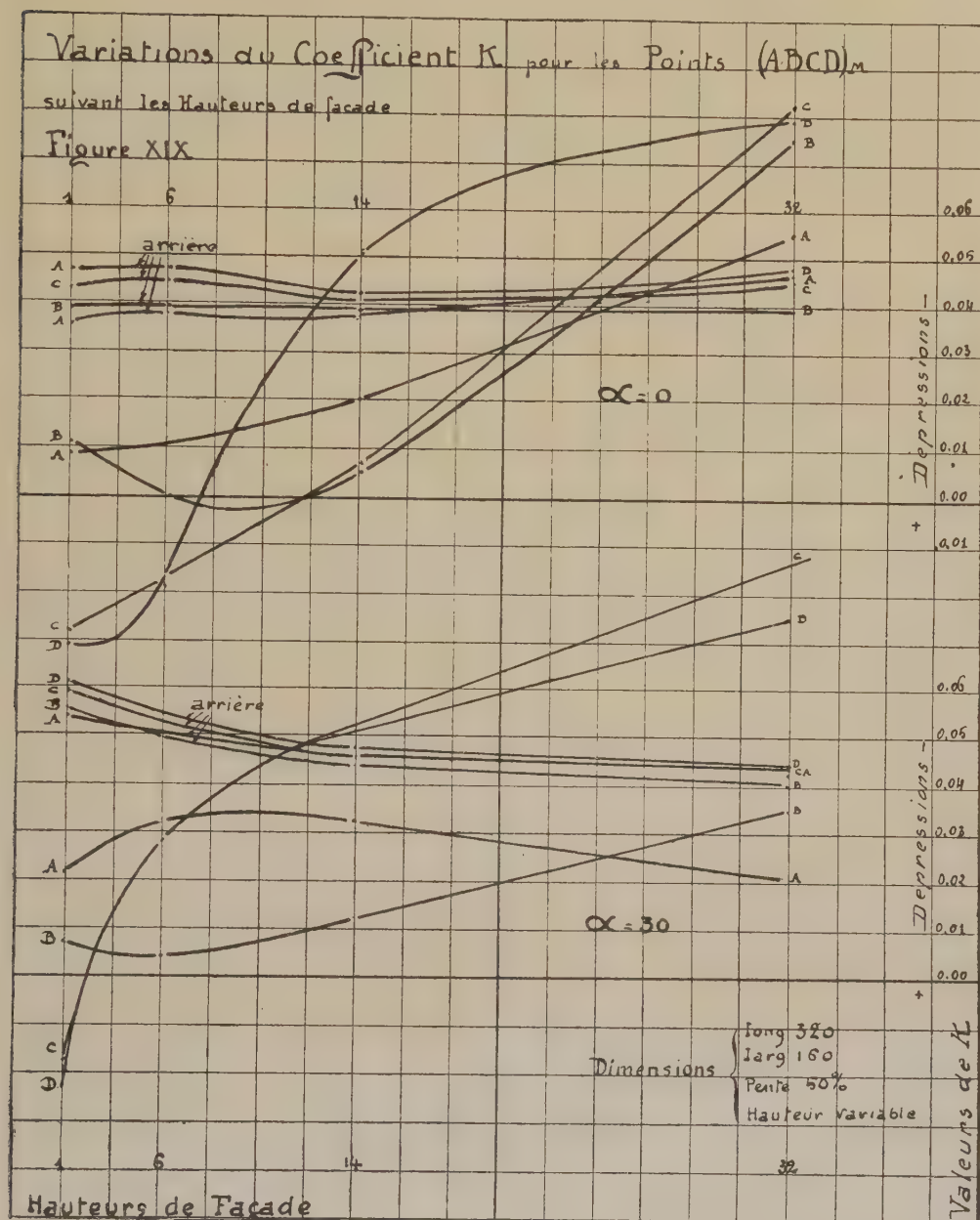
La façon d'envisager les résultats trouvés pour les valeurs maxima de K peut choquer en ce sens, que, si nous prenons sur toutes les lignes horizontales A B C D



les points maxima, nous obtiendrons en les joignant une ligne sur laquelle on pourra appliquer le coefficient K maximum, alors que partout ailleurs sur la toiture il se trouve trop élevé.

A ce sujet, nous ferons remarquer que les courbes donnant le maximum sont presque toujours à très grands rayons de courbure, et que, d'autre part, le bâtiment pouvant être attaqué par le vent sous n'importe quelle direction, il s'en suit que

la ligne de maximum sera double sur un même versant puisqu'il y aura toujours la symétrique d'une première courbe par rapport au plan médian.



Dans ces conditions, nous pouvons admettre le même coefficient sur toute la surface.

Le plus commode pour rechercher ces maxima sur les lignes des A, des B, des C et des D est de se servir des figures 10 et 11 où sont représentées les courbes de variation du coefficient, quand on se déplace sur les lignes en question, et cela, pour les différents angles de rotation du hangar.

Nous avons représenté sur le tableau ci-dessous les différentes valeurs du maximum avec l'angle α correspondant, et cela pour chacune des hauteurs de façade ayant servi dans les expériences.

TABLEAU DES MAXIMUMS MOYENS

HAUTEUR DE FAÇADE	LIGNE DE POINTS OBSERVÉS	VALEUR DE α POUR LE MAXIMUM DE K	VALEUR DU MAXIMUM
20 m/m.	A.....	120	— 0,0680
	B.....	120	— 0,0850
	C.....	120	— 0,0700 — 0,0750
	D.....	120	— 0,0700 — 0,0730
140 m/m.	A.....	120	— 0,0680 — 0,1050
	B.....	120	— 0,0700
	C.....	60	— 0,1050
	D.....	120	— 0,0680
320 m/m.	A.....	120	— 0,0640
	B.....	120	— 0,0640
	C.....	0	— 0,0700
	D.....	0	— 0,0700
	A.....	120	— 0,0650
	B.....	0	— 0,0750
	C.....	120	— 0,0630
	D.....	30	— 0,0860
	A.....	0	— 0,0820
	B.....	60	— 0,1150
	C.....	30	— 0,0800
	D.....	60	— 0,1300

Dans le tableau ci-dessus, nous voyons que pour 20 millimètres de hauteur de façade, le maximum maximum est voisin de $K = -0,0750$. Pour une hauteur de 140 millimètres, certains points dépassent le coefficient $K = -0,100$; comme ces points sont très près des bords, nous ne tiendrons pas compte de ces grands coefficients, comme nous l'avons vu plus haut. Nous trouvons un résultat identique pour la troisième hauteur.

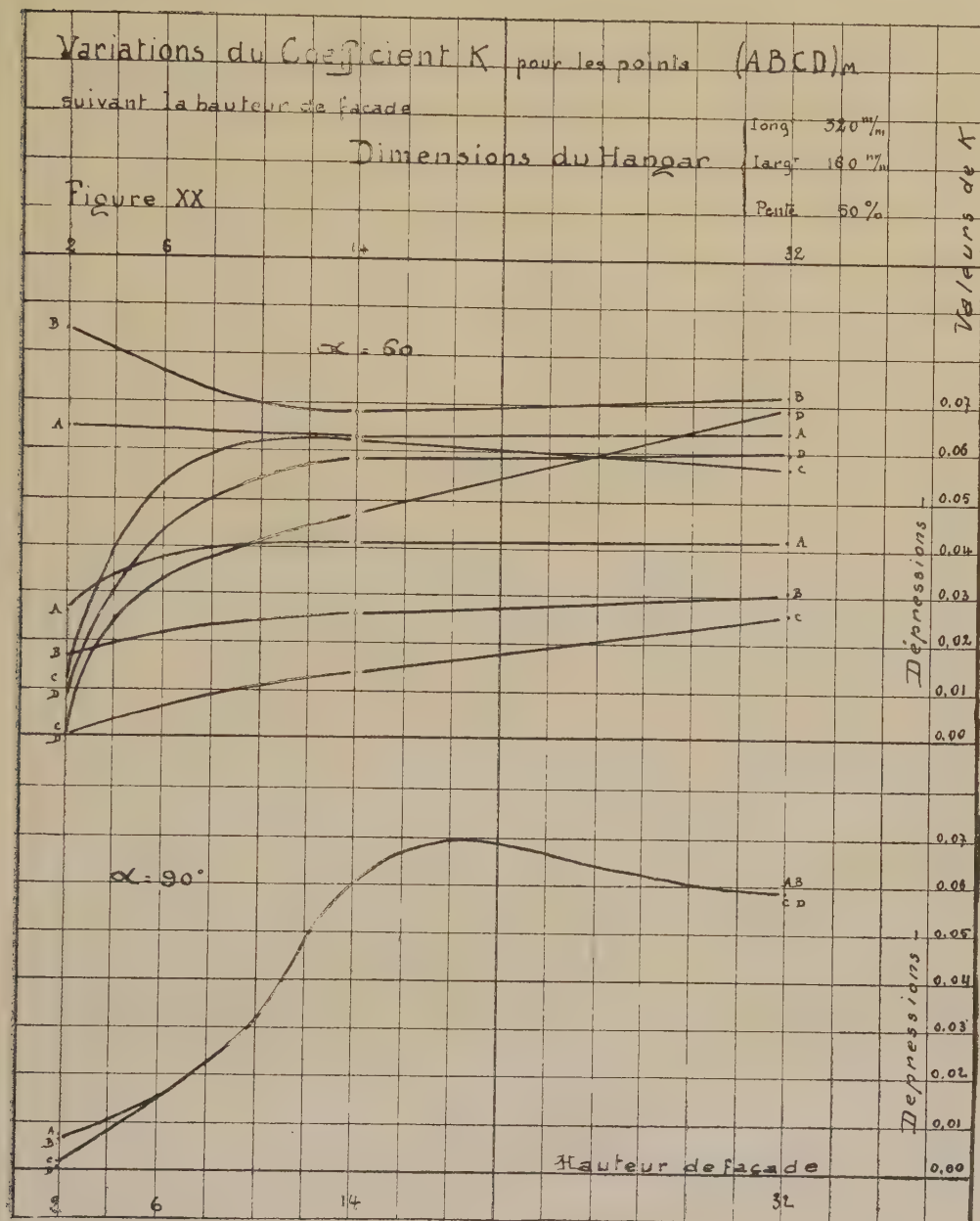
Pour $\alpha = +120^\circ$, la valeur maximum de K sur les quatre lignes oscille entre $-0,0550$ et $-0,0650$. Pour 0° , le maximum de K varie entre $-0,0550$ et $-0,100$; pour 30° , ce maximum reste compris entre $-0,0400$ et $-0,0850$. Nous pensons qu'il faudra pour coordonner les résultats, prendre la moyenne des maxima sur chaque ligne, correspondant à chacune des directions du hangar. Nous trouvons ainsi pour $0^\circ -0,0750$, pour $30^\circ : -0,0625$; pour $120^\circ : -0,0625$.

Nous pouvons donc admettre que le coefficient utile dans le cas d'un angle de toiture de $26^\circ 30'$ est voisin de $K = -0,0750$.

Nous recherchons maintenant si l'angle d'inclinaison de la toiture peut influer sur la valeur du coefficient K trouvé comme maximum moyen.

Si nous examinons la figure 27, donnant les courbes de variation de K, suivant l'angle de la toiture, pour une direction du hangar correspondant à $\alpha = 120^\circ$ (cette direction est en effet celle pour laquelle nous avons presque toujours trouvé le maximum), nous observons comme dans les figures 25 et 26 deux zones : la première

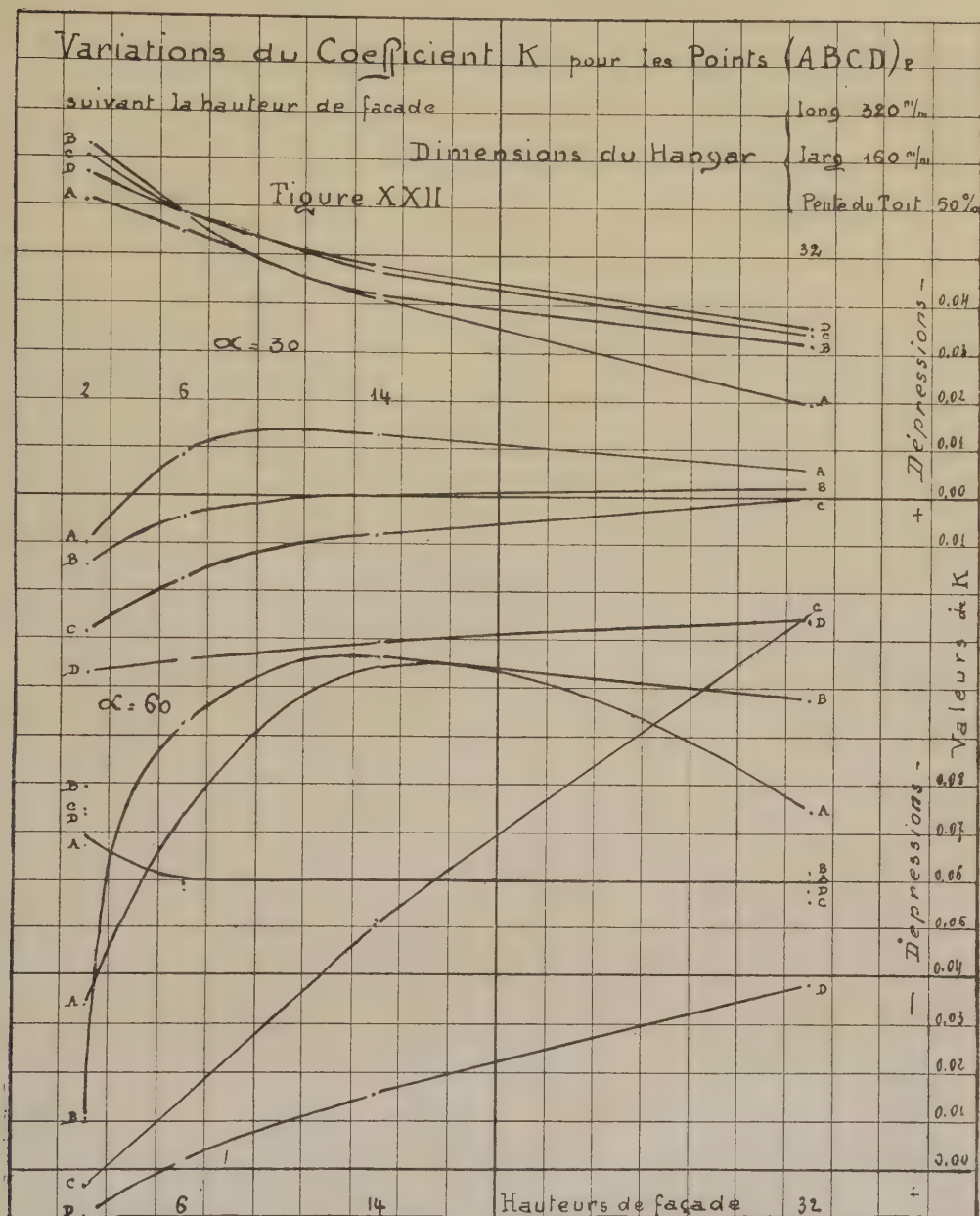
pour laquelle la pente de la toiture est supérieure à 20° , et la deuxième quand la valeur de γ est inférieure à 20° .



Dans la première, les valeurs de K restent sensiblement constantes quel que soit γ . Ainsi pourrions-nous garder comme coefficient à retenir $K = 0,0750$.

Au contraire, pour γ inférieure à 20° , sauf en ce qui concerne la toiture terrasse, où les précédents résultats restent valables, il est difficile de donner une précision quelconque. En effet, les coefficients à appliquer aux points soumis directement à l'action du vent, sont très grands pour l'aspiration, et nous voyons par

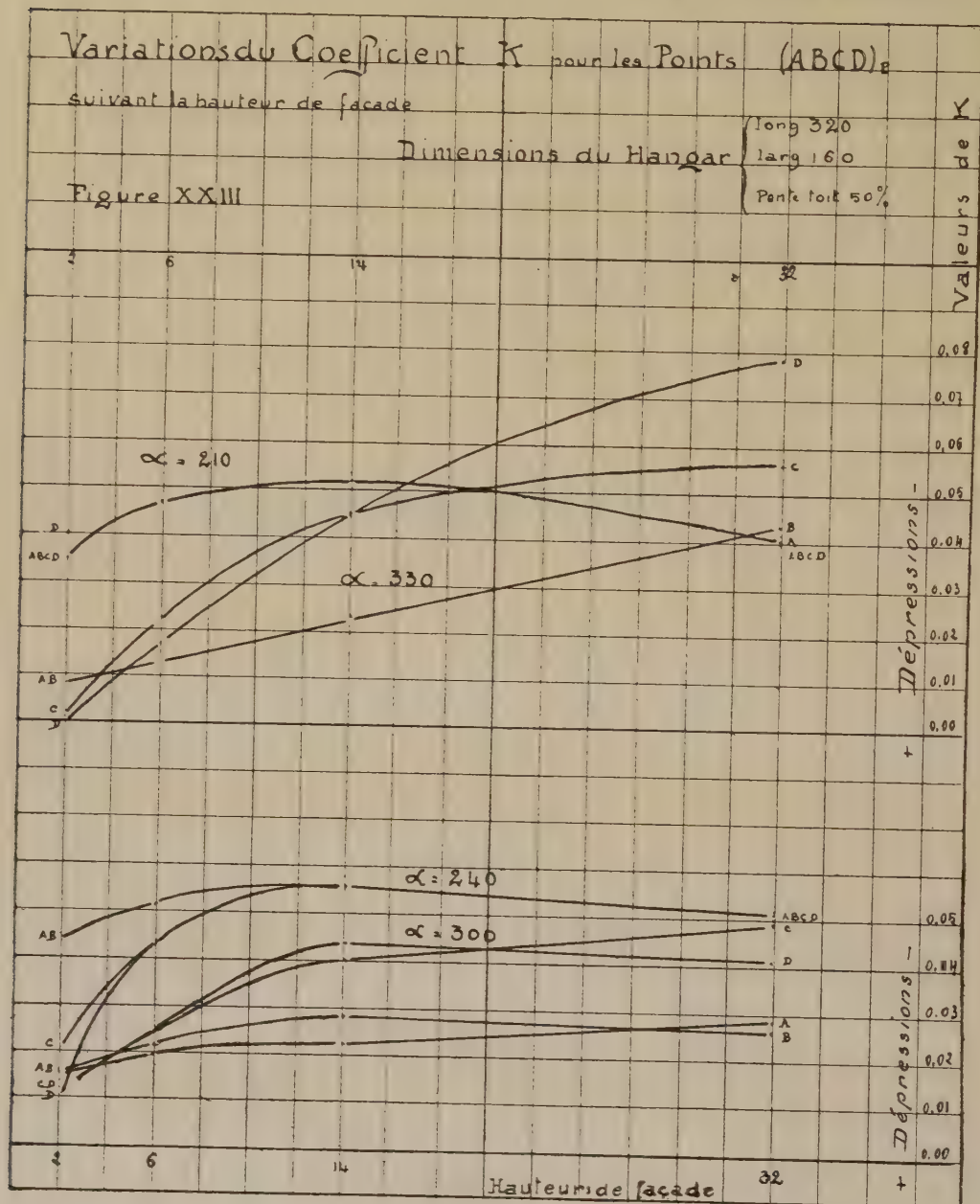
Quant aux pentes intermédiaires, on devra alors appliquer un coefficient plus important — 0,0900 par exemple, qui ne semble pas exagéré et qui correspond à



un effort d'aspiration de 150 kgs par mètre carré environ pour $V = 40$ mètres seconde.

Nous avons vu que pour $\alpha = 120^\circ$, nous avons un maximum d'aspiration sur l'un des versants de la toiture, il est intéressant de savoir quel sera dans ce cas la valeur de ce maximum sur l'autre versant.

Les efforts sur ce deuxième versant nous sont donnés pour $\alpha = 60^\circ$. Nous observons alors qu'à l'aplomb des pignons sur la toiture, se trouvent les plus grandes

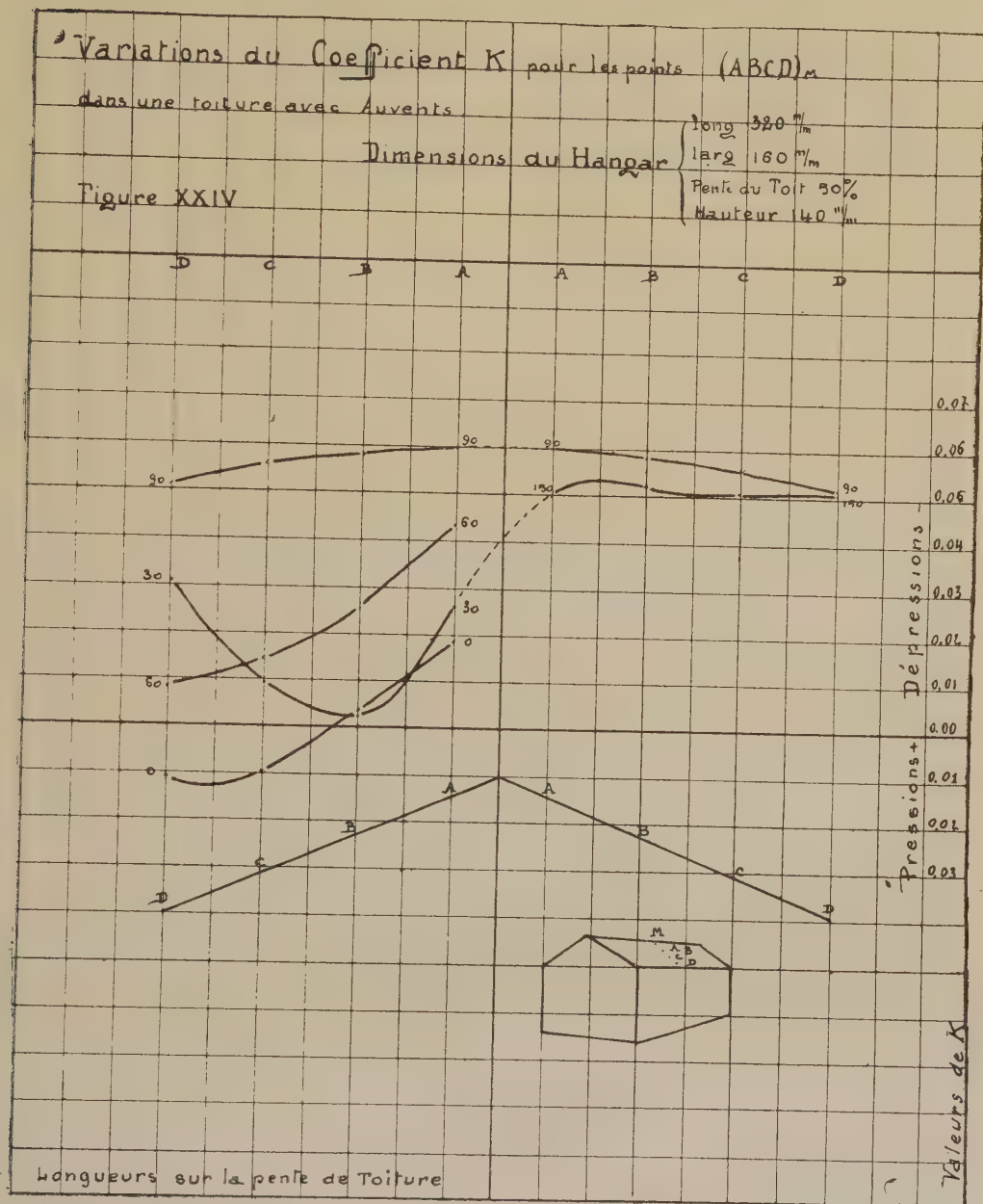


valeurs de K . En prenant pour les différentes hauteurs, les maximums moyens de K , nous arriverons à un chiffre très voisin de — 0,0750.

Il sera donc utile dans les calculs de résistance d'une charpente d'appliquer ce coefficient pour tenir compte d'une aspiration possible sur les deux versants à la fois.

Ayant observé les résultats de l'aspiration due au vent sur une toiture, il nous

reste à parler de la pression produite. Les valeurs positives n'agissent ordinairement que sur le bord inférieur de la toiture, et la région soumise à cet effort augmente



à mesure que grandit la valeur de γ . Ne pouvant pas définir d'une façon exacte le coefficient à adopter, nous essaierons de proposer une moyenne commode pour tenir compte de ces efforts dans les calculs pratiques.

Si nous examinons les courbes construites à la suite des premières expériences, nous trouvons que les valeurs positives de K n'atteignent pas + 0,0300.

Nous devons tenir compte dans ce cas des éléments extrêmes des courbes, car

la présence d'une corniche ou de tout autre obstacle à l'écoulement vertical de l'air agit de la même façon qu'une diminution de hauteur.

D'autre part, l'examen des courbes représentatives des variations de K suivant l'angle de la toiture, montre que ces courbes, pour les points soumis au vent, deviennent très nettement positives quand l'angle γ augmente, et cette observation est surtout remarquable pour $\alpha = 30^\circ$.

Nous proposons pour coefficient à appliquer sur le versant soumis au vent une formule simple donnant sensiblement les résultats trouvés dans les expériences, en tenant compte à la fois de l'influence de la hauteur de la façade et de l'angle de la toiture :

$$(1) \quad K = 0,0625 \sin.^3 \gamma \left[1 + \frac{5 I^2}{I^2 + 2 h^2} \sin.^4 (90 - \gamma) \right]$$

où nous avons admis :

γ angle d'inclinaison des versants de la toiture sur l'horizontale,

I largeur du hangar,

h hauteur de façade,

Il faudrait évidemment tenir compte de la variation des efforts sur la toiture ; c'est pourquoi nous pensons qu'il serait bon d'appliquer la formule ci-dessus pour déterminer le coefficient au bord de la toiture, et, en admettant une pression nulle au sommet de celle-ci. La courbe représentative des valeurs de K serait alors une droite.

Il n'y a pas lieu de penser que cette formule donne une exactitude absolue ; nous n'avons cherché qu'à donner un moyen commode de figurer dans les calculs des résultats des expériences précédentes.

Sur le versant opposé à celui soumis à une pression, nous aurons une succion. étant donné que la pression maximum se produit pour $\alpha = 30^\circ$, nous voyons que pour $\alpha = 150^\circ$, la moyenne des valeurs maximums de K est d'environ $-0,0500$.

Le calcul d'une toiture devra donc être fait de façon qu'elle puisse résister dans toutes ses parties à une aspiration de $P = -0,0750 S V^2$.

D'autre part, tous les éléments devront pouvoir supporter une pression donnée par la formule (I) dans les conditions indiquées.

Enfin, on devra s'assurer que les fermes sont capables de résister au moment résultant produit sur un versant par l'effort de pression tel que nous l'avons défini ci-dessus, l'autre versant supportant une succion donnée par la formule :

$$P = -0,0500 S V^2$$

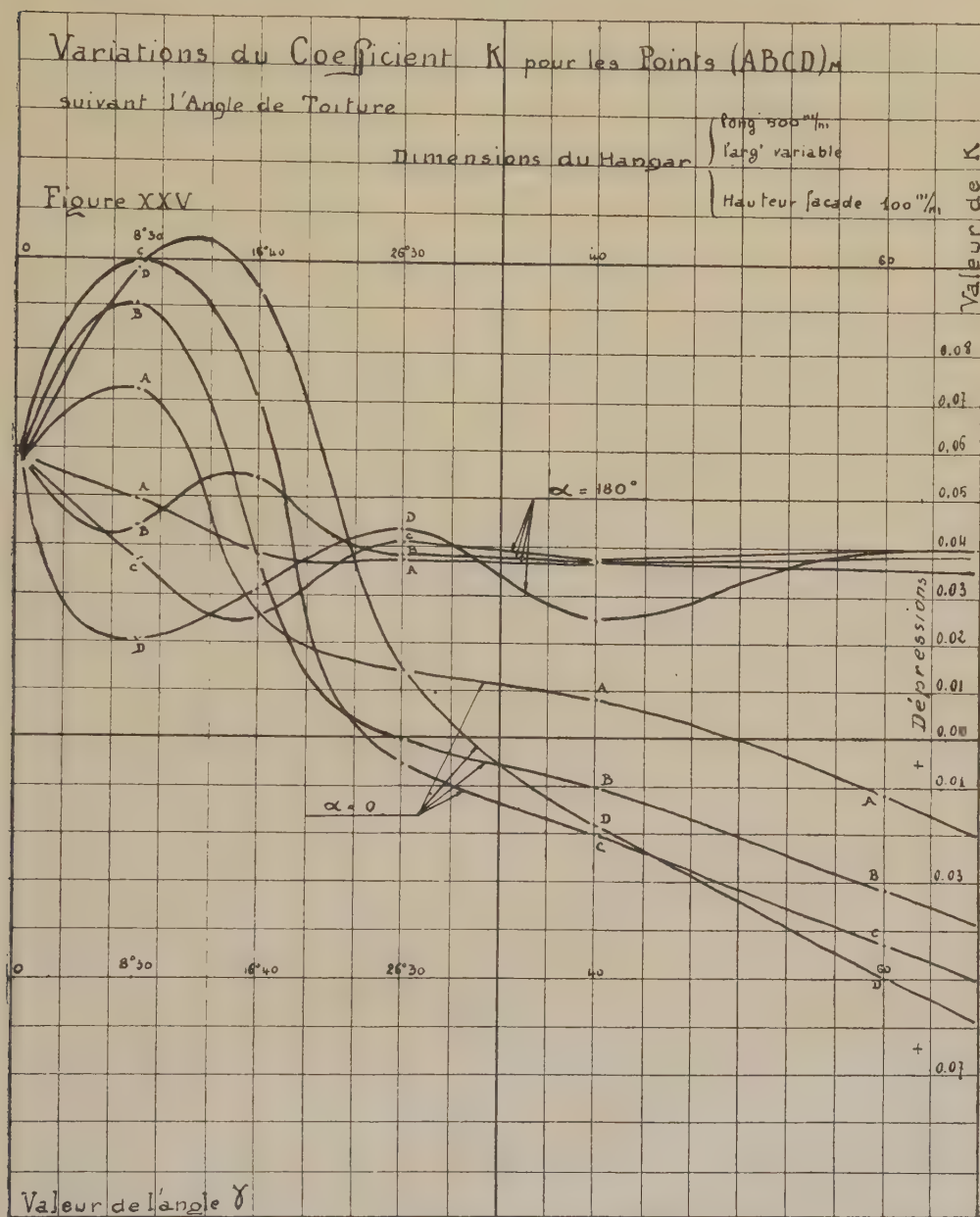
Nous faisons remarquer que l'effort négatif peut atteindre, et pour les toitures à faible pente, dépasser 120 kgs par m^2 avec un vent de 40 mètres/seconde.

Il faudra donc faire très attention aux systèmes d'attache employés dans les éléments d'une toiture, systèmes qui sont souvent fort défectueux, et en exemple à observer, les toitures en tuiles disposées quelquefois de telle sorte qu'elles peuvent subir des efforts notables.

On y a remédié par un œilleton placé en dessous de la tuile faisant corps avec celle-ci et servant à attacher la tuile par un fil de fer.

Or, il est à remarquer qu'à la suite d'un coup de vent, l'œilleton est le plus souvent brisé, ce qui indique bien qu'il y a eu traction. Il semble qu'il serait facile d'imaginer un œilleton capable de résister à l'effort à supporter.

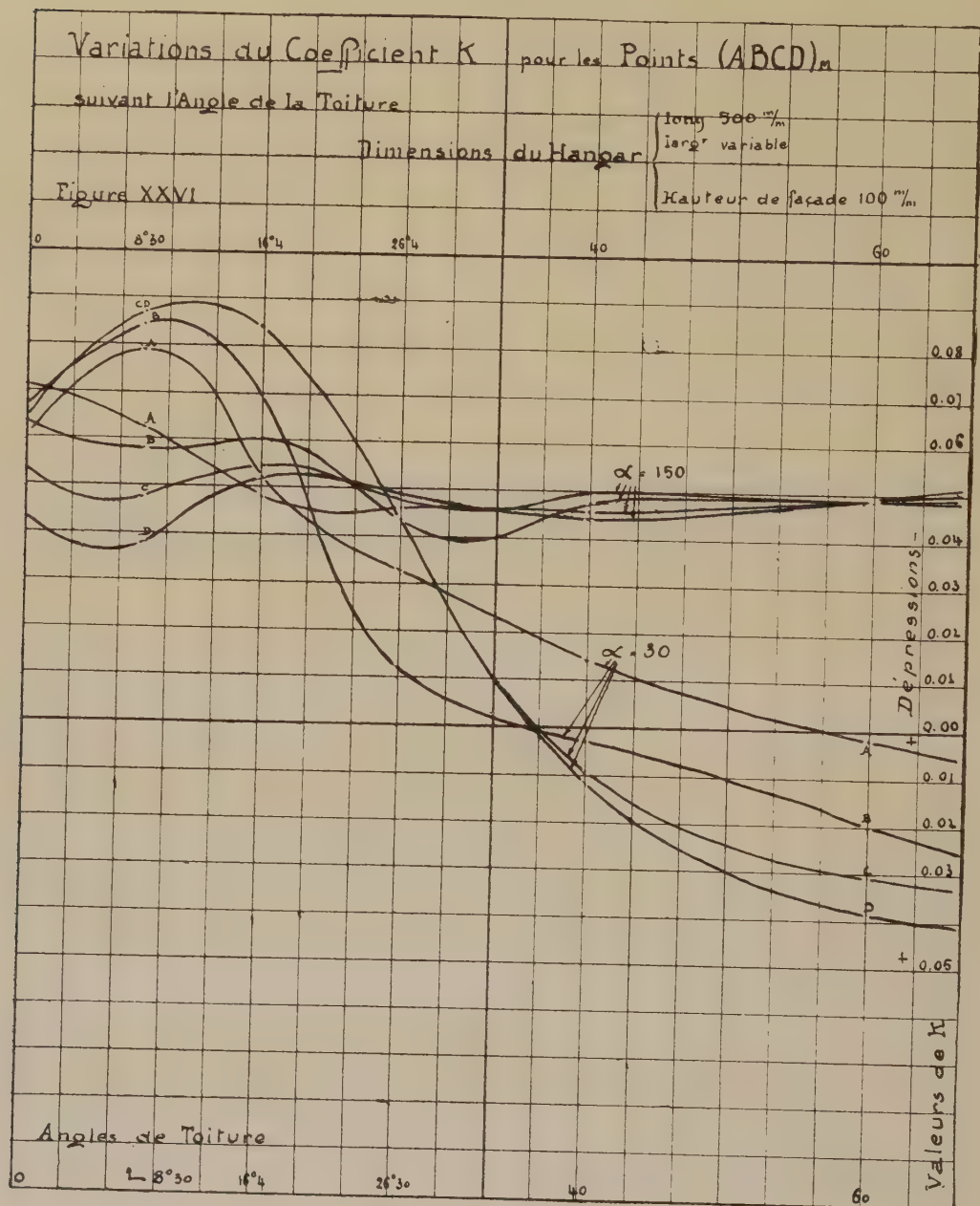
Il faut dire d'ailleurs qu'il est assez peu de couvertures exposées à un vent de 40 mètres/seconde. Il suffit, en effet, d'une orientation différente du hangar pour



atténuer sur une toiture les effets d'une grande tempête, toutefois le cas de tuiles, d'ardoises ou de plaques soulevées est assez fréquent pour que nous puissions le signaler.

Au contraire, la charge positive pour une toiture à 50 %, qui est la pente la plus communément employée, est relativement faible par les plus grands vents. Nous ferons remarquer à ce sujet que nous arrivons à un résultat très conforme à

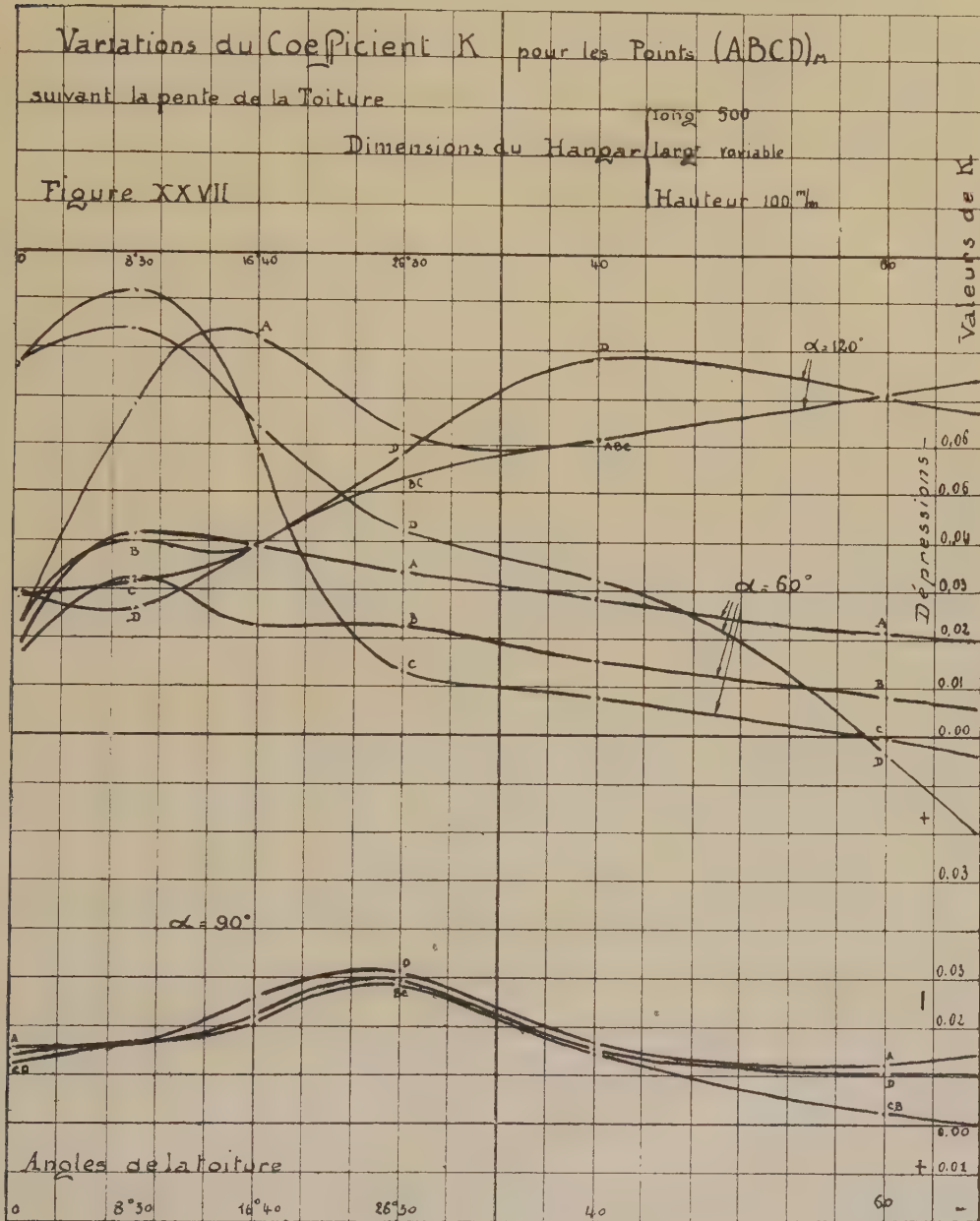
celui admis par EIFFEL au sujet de la loi du sinus carré encore appliquée aujourd'hui pour le calcul des toitures.



En se servant de la loi du sinus carré, nous arrivons à des charges bien trop fortes pour le versant soumis au vent, et on ne tient aucun compte des efforts de succion qui agissent sur l'un et l'autre versant.

Il est certain que les efforts positifs agissent dans le même sens que la couverture pour produire un moment de flexion, mais il doit à notre avis être tenu compte

dans ce cas des efforts de succion sur l'autre versant, qui peuvent éventuellement être une cause d'économie, puisqu'ils ont pour effet de soulager la toiture.



Il sera toujours possible d'ailleurs de créer un système d'attache de la ferme au bâtiment pour résister aux efforts de traction susceptibles de se produire.

Nous signalerons aussi que, dans le cas d'un hangar ouvert sur les quatre faces, les efforts seront très suffisants quand ils seront déterminés par les formules ci-dessus.

Le vent soufflant en rafales très brusques pouvant seul avoir une action sur ces constructions ouvertes à toutes les pressions.

Les efforts sur les parois verticales peuvent être déterminés par l'examen des figures 15, 16, 17 et 18, nous voyons que le maximum maximorum obtenu est sensiblement $+ 0,0625$.

Dans les calculs du hangar, nous devons tenir compte des efforts sur les façades et sur les pignons, efforts qui pourront être calculés avec une charge donnée par la formule :

$$P = + 0,0625 SV^2$$

Dans ce cas, le coefficient a été trouvé pour $\gamma = 0$

Nous remarquerons qu'il faudrait adopter comme charge d'aspiration sur la façade ou le pignon non soumis au vent, celle représentée par la formule :

$$P = - 0,0450 SV^2$$

Les calculs des combles et des toitures sont actuellement exécutés en se basant sur la circulaire ministérielle du 17 février 1903, donnant en même temps les surcharges de vent et de neige à appliquer dans les projets.

Les expériences que nous avons faites ont montré que pour une toiture dont la pente est inférieure à 45° , les efforts positifs ne dépassent guère 50 kgs par mètre carré de toiture, pour les toitures à pentes normales, et encore sur le bord inférieur de celles-ci.

D'autre part, il est très rare d'avoir une valeur de 40 mètres/seconde comme vitesse du vent, quand il y a 30 kgs par m^2 de neige par m^2 horizontal. Aussi, si on applique aux deux versants d'une toiture une surcharge utile de neige de 60 kgs par m^2 , pourra-t-on admettre que le vent agissant sur cette même toiture, préalablement chargée par 30 kgs de neige par m^2 horizontal, ne donnera pas vraisemblablement des efforts égalant ceux obtenus avec la première surcharge.

Pour α compris entre 45° et 60° , la neige séjourne peu et 60 kgs seraient encore suffisants en l'appliquant comme surcharge de neige à toute la surface, puisque le maximum de charge avec le vent est au bord du toit. Au-dessus de cette valeur de α , la neige ne séjourne pas, mais le vent peut atteindre 100 kgs par m^2 de toiture pour α voisin de 90° .

En résumé, une toiture de pente normale calculée pour résister à 60 kgs de neige, serait vraisemblablement susceptible de tenir sous un vent de 40 mètres-seconde.

Il est parfois utile de connaître pour quelle position d'un hangar la stabilité de celui-ci est la plus assurée, quand on connaît la direction des vents dominants. Cette question est assez complexe et varie suivant les éléments du hangar. Nous remarquerons cependant que si la façade fait un angle de 30° avec la direction du vent, et le pignon 60° avec cette même direction, il semblerait qu'alors les efforts généraux passeraient par un minimum.

Ces valeurs de K que nous venons d'indiquer ne sont valables qu'autant que le bâtiment est isolé.

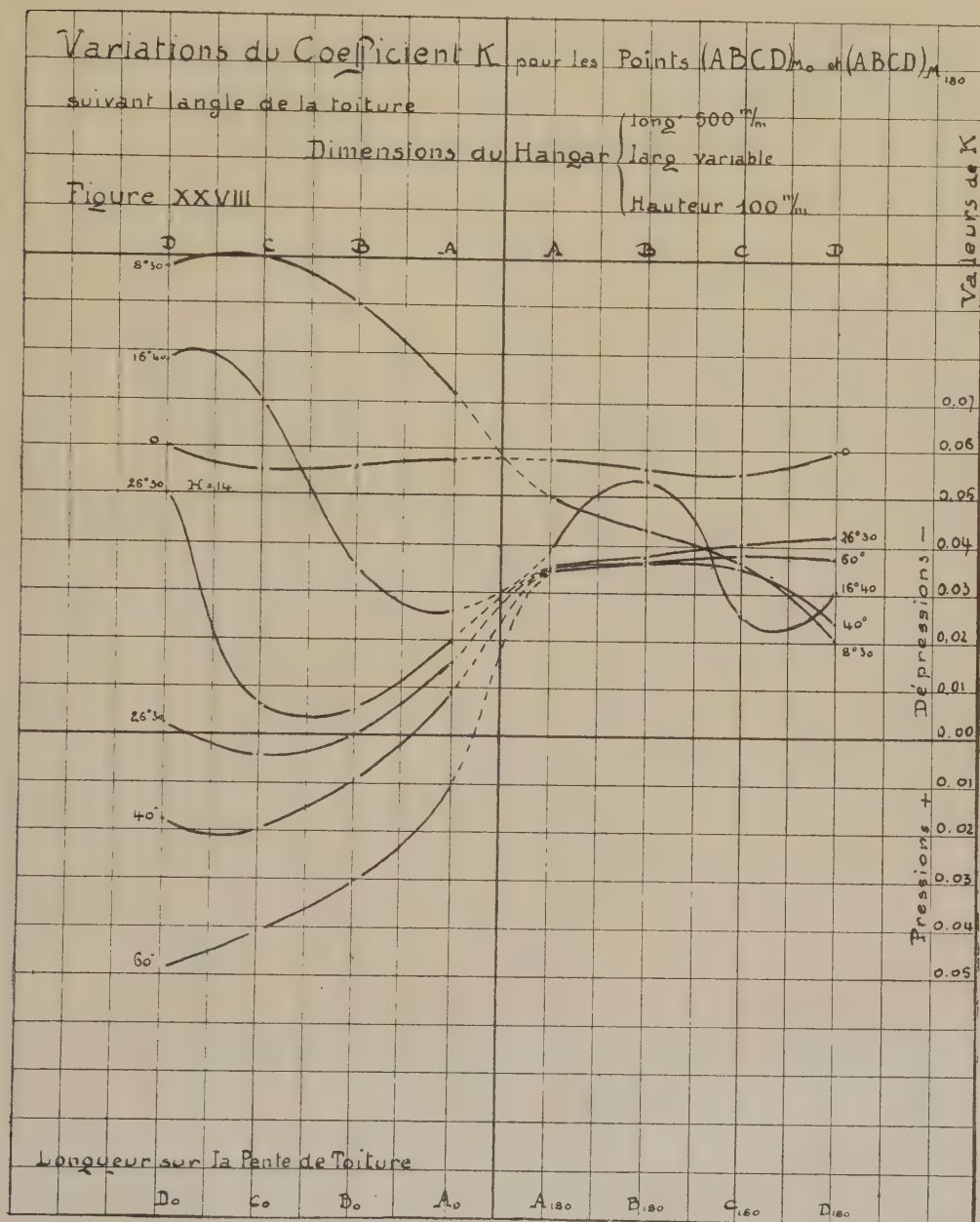
Il s'ensuit que la présence d'autres constructions, de murs et éventuellement d'arbres, suffit à diminuer considérablement et même à supprimer l'effet du vent.

Dans les villes par exemple, il n'y aura pas lieu de tenir compte du vent, pour les façades de bâtiment sur rue.

Seules, seront soumises à l'action du vent, les toitures, les cheminées et tout ce qui dépasse ou atteint le niveau habituel des constructions dans une agglomération.

Le coefficient à adopter ne peut être alors que laissé à la libre appréciation de l'ingénieur ou de l'architecte chargé des travaux.

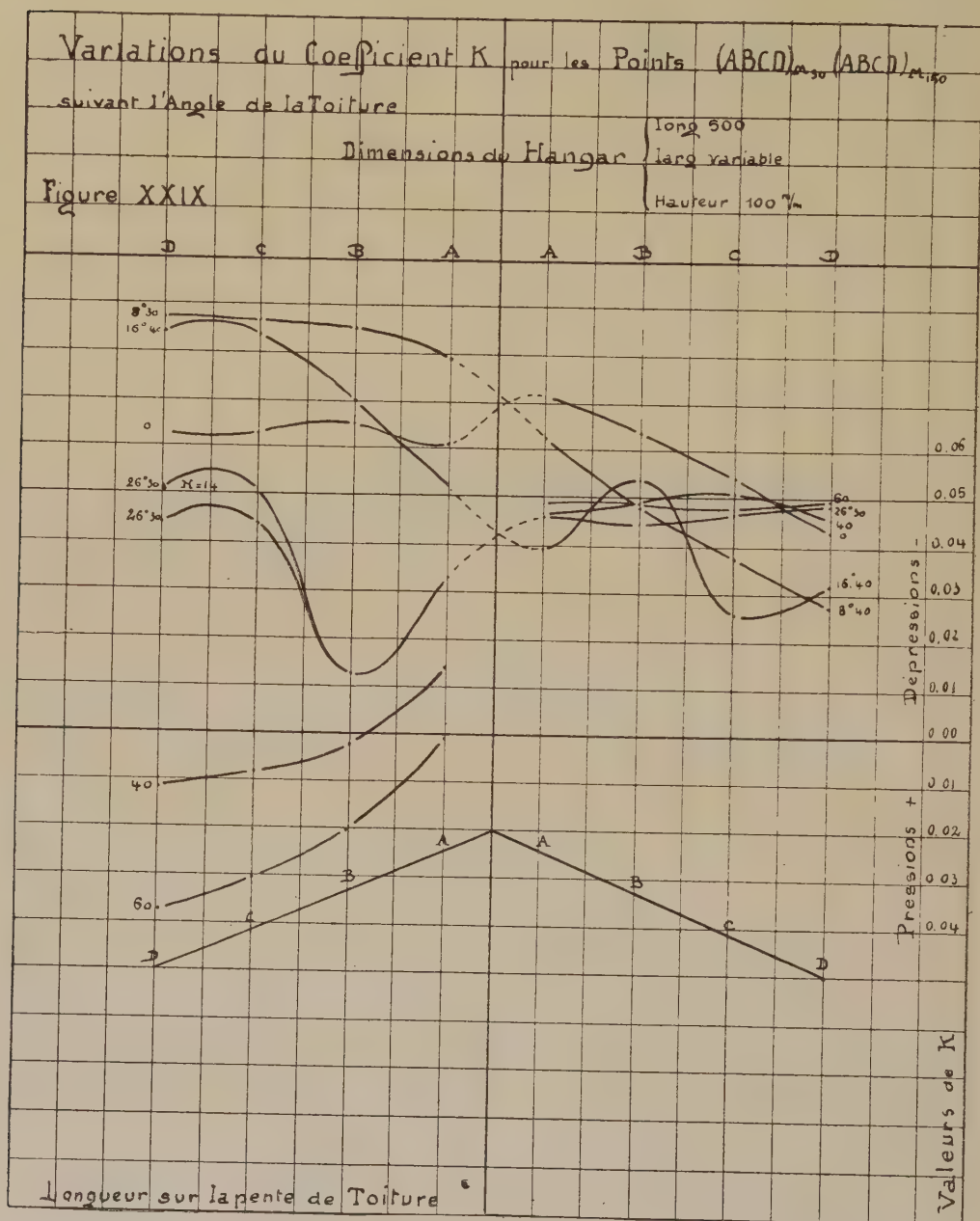
On devra appliquer aux constructions avec toiture parabolique les résultats trouvés sur la figure 32. Aucun résultat général, ni aucune formule simple n'arri-



verait à donner une valeur exacte de la dépression à utiliser dans les calculs. Nous laisserons aux constructeurs le soin de tirer des conclusions pour ce genre de toiture.

Il semble utile de faire remarquer que contrairement à ce qui est admis dans les calculs, il n'y a aucune pression, et que seules les dépressions entrent en jeu.

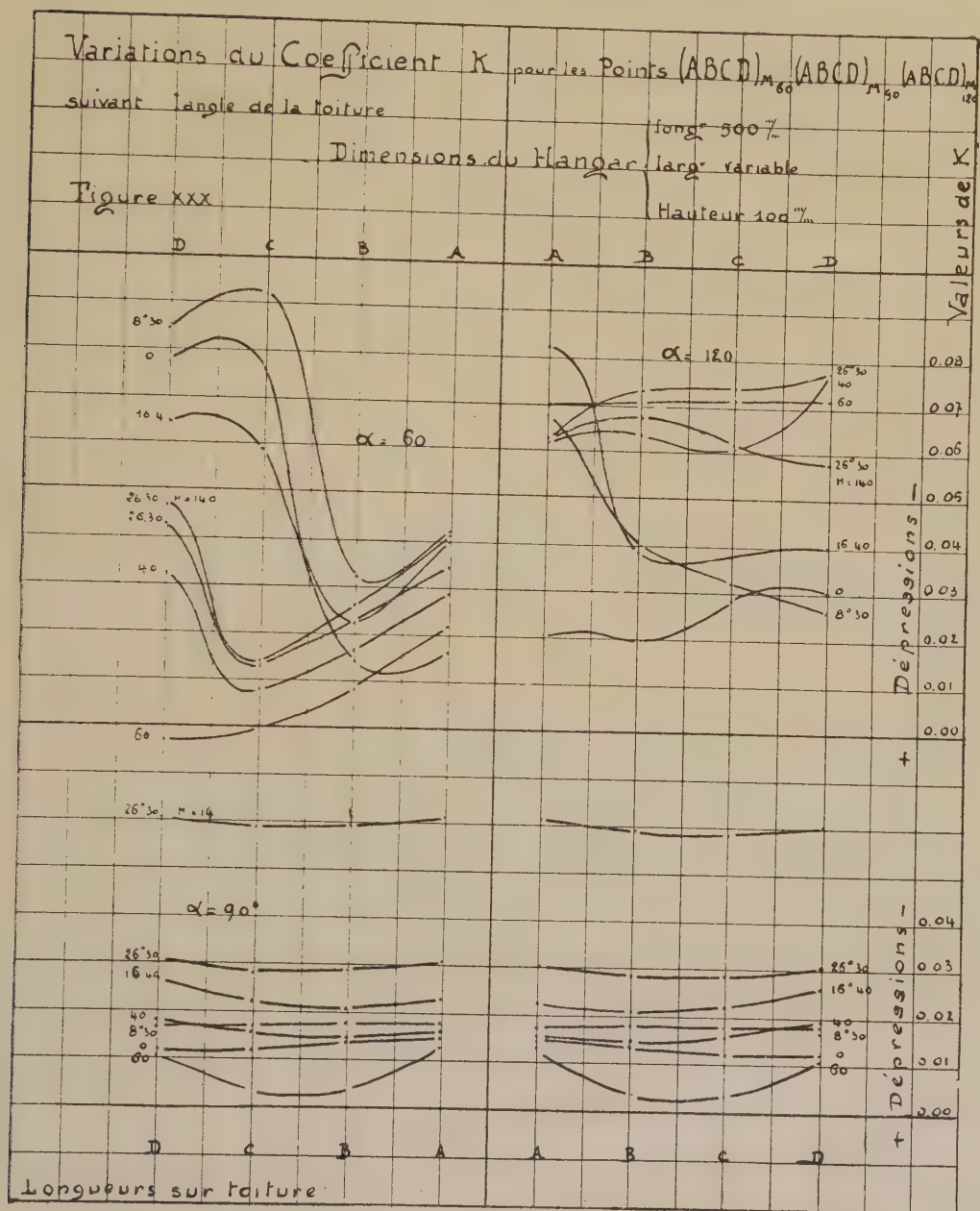
D'autre part, l'effet du courant d'air ascendant sur la façade semble très atténué par rapport à ce qui se produit dans les toitures ordinaires. Nous pouvons voir



aussi que pour un vent arrivant à 90° , la dépression constante est formulée par $P = -0,0550 SV^2$.

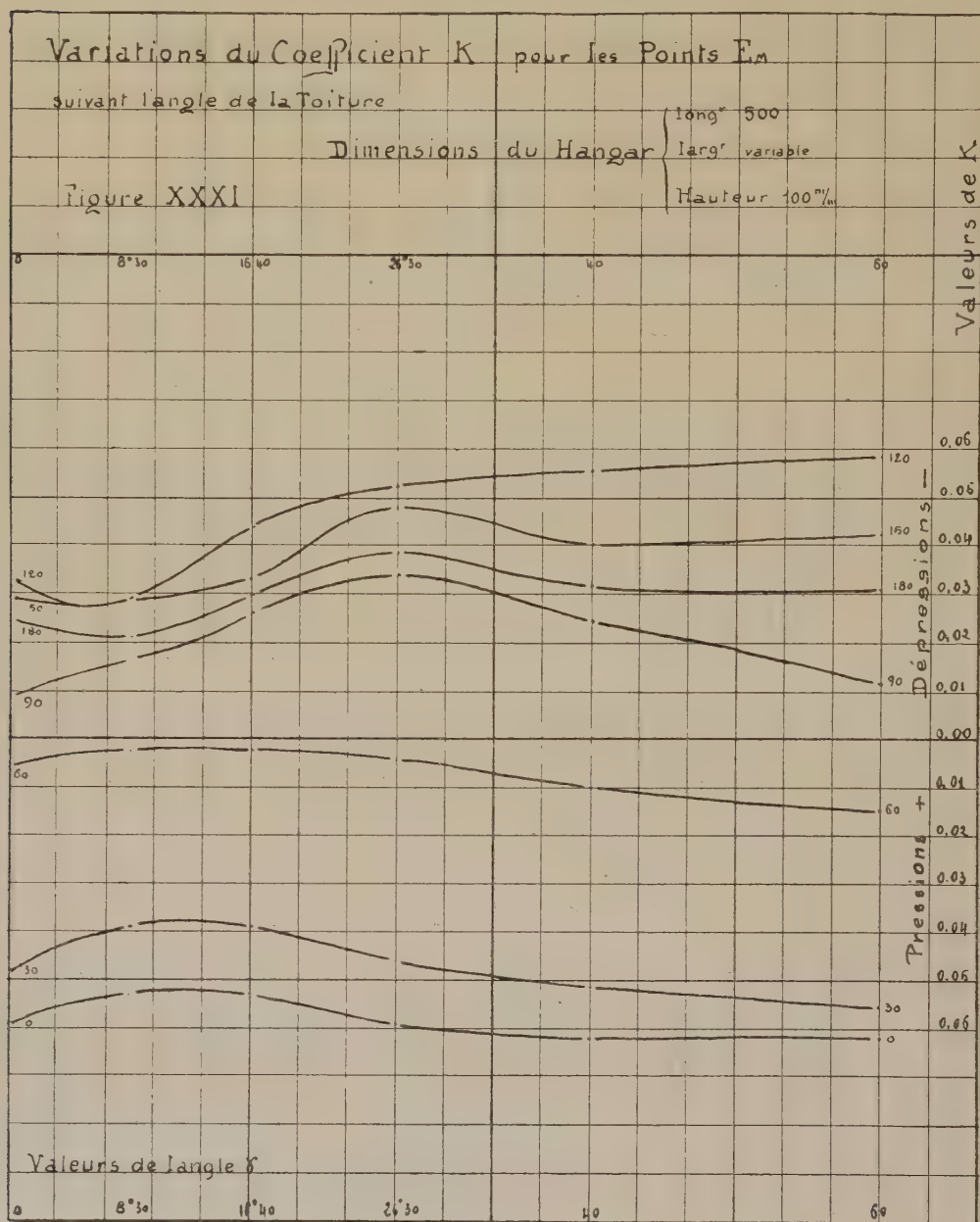
Si, comme il arrive souvent dans les hangars d'aviation, un pignon est ouvert, nous pourrons avoir sur la toiture un effort de soulèvement correspondant à la somme des 2 efforts $(-0,0550) + (-0,0800)$, soit $-0,1350$ correspondant à environ 216 kgs de sous-pression.

Nous faisons remarquer que EIFFEL dans son étude, arrive à un chiffre très voisin pour les hangars à pignon ouvert sans lanterneau.



Il faudra donc, dans les hangars d'aviation, employer de préférence les toitures lourdes qui seules permettent de pronostiquer une durée, étant donné les efforts considérables de sous-préssion qu'ont à supporter les éléments d'une toiture. Les constructions des parcs d'aviation sont naturellement en des endroits exposés aux vents, et, toutes les toitures ne résistant pas par leur poids sont sujettes à une des-

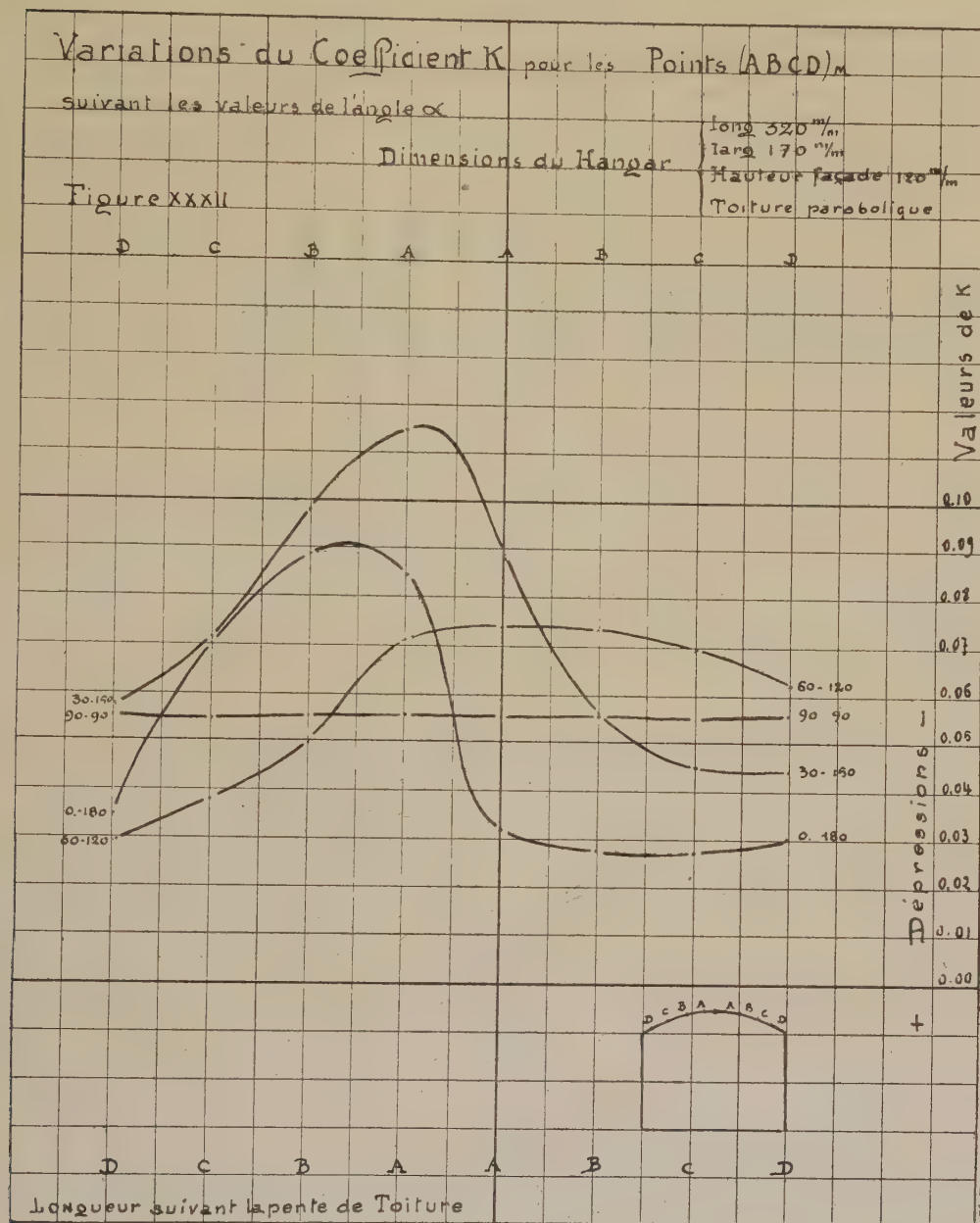
truction plus ou moins rapide, et, en tous les cas, entraîneraient des frais de réparation qui ne sont pas à négliger dans l'élaboration d'un projet.



Il nous reste à parler, pour finir cette étude, de l'influence de la largeur et de la hauteur sur les valeurs du coefficient K, quand le hangar est placé dans une direction telle que $\alpha = 90^\circ$, c'est-à-dire quand le vent frappe directement un pignon.

Pour cette position, nous avons observé un phénomène d'un autre genre. En effet, pour une hauteur de 20 millimètres, nous observons au droit du pignon atta-

qué par le vent un maximum suivi d'une décroissance terminée très rapidement par un minimum, la courbe continuant à croître ensuite.



Pour $h = 140$ millimètres, le maximum s'éloigne du pignon ainsi que le minimum ; pour $h = 320$ millimètres, ces résultats se trouvent encore amplifiés.

Ce phénomène ne dépend pas uniquement d'une des dimensions : hauteur ou largeur ; s'il en était ainsi, quand la hauteur augmente ou quand relativement la largeur diminue, on devrait observer sur les façades le même phénomène que

pour les petites hauteurs, c'est-à-dire qu'on devrait revoir le maximum et le minimum se rapprocher du pignon attaqué par le vent. Or, au contraire, le phénomène est exactement identique à ce qui se produit sur la toiture, ce qui tendrait à prouver qu'il n'est fonction que de la grandeur de la surface attaquée par le vent.

De là vient que dans les expériences sur la recherche de l'influence de l'angle de la toiture : la longueur du hangar ayant été augmentée, et par cela même la distance du plan médian au pignon étant plus grande, comme nous avons sensiblement la même surface de pignon qu'avec le hangar de la première expérience, nous devons trouver pour $\alpha = 90^\circ$, une dépression plus petite que celle que nous avons dans ce premier cas. C'est bien le résultat que nous observons.

Enfin, nous remarquerons qu'il est difficile en dehors des cas classiques que nous venons d'étudier, de formuler une règle générale. Dans tous les cas où de grands hangars de formes particulières devront être construits, il sera souvent économique, avant tout calcul, de chercher quels seront les efforts réels qui agiront sur une semblable construction pour une étude dans une soufflerie sur un modèle réduit.

CHAPITRE XIII

Utilisation des résultats trouvés au tirage des cheminées

Nous parlerons pour finir d'une application possible des résultats trouvés dans les expériences ci-dessus, c'est le tirage des cheminées.

Nous avons vu que, lorsque le vent frappe une paroi verticale, il y avait, à la partie supérieure, une diminution de la pression, et que cette diminution correspondait à un courant d'air ascendant provoquant sur la toiture une dépression souvent très considérable. Nous avons vérifié la présence de ce courant par l'interposition d'un petit auvent qui supprimait en grande partie la dépression de la toiture.



Il serait éventuellement possible d'utiliser cette montée de l'air au tirage des cheminées. Il suffirait pour cela d'ouvrir du côté où la pression du vent se fait sentir un écoulement facile à ce courant ; nous arrivons ainsi à la conception de la suppression des corniches qui brisent ce mouvement ascendant et empêchent la succion correspondante d'agir au sommet de la cheminée.

D'autre part, le tirage d'une cheminée, en utilisant la présence d'air chaud qui crée un courant ascendant dont nous n'avons pas à nous occuper, pourrait peut-être être activé par une forme judicieuse du sommet de la tour, de manière à utiliser de la meilleure façon les dépressions pouvant provenir de l'action du vent.

Il serait possible d'imaginer certaines ouvertures placées au sommet, disposées par exemple suivant la figure ci-contre, qui utiliseraient la montée verticale de l'air en faisant pénétrer à l'intérieur de la tour un courant rapide qui agirait sur les fumées sortant de la cheminée.

Derrière la tour, la dépression pourrait agir pour attirer une partie de la fumée, mais nous n'aurions guère à craindre les courants descendants, étant donné la masse d'air ascendante en mouvement dans la tour.

Il pourrait d'ailleurs éventuellement être créé un courant ascendant sur la partie arrière de la tour, en donnant à la partie supérieure une forme crénelée, qui permettrait au vent d'agir par sa pression et sa dépression en augmentant le courant d'air vertical à l'intérieur de la cheminée.

Nous ferons remarquer que nous retrouverons à quelque chose près l'aspect habituel des cheminées, puisque l'auvent supérieur pourrait avoir des formes quelconques.

De manière à utiliser de la façon la meilleure ce courant vertical, il sera bon, nous semble-t-il, de favoriser la saillie des nervures à l'extérieur de la tour : celle-ci créerait un obstacle à la fuite de l'air suivant un courant horizontal et favoriserait en même temps la création d'une pression supplémentaire qui ne ferait qu'augmenter le courant vertical. Il sera bon de donner un fruit aux cheminées, de façon à favoriser l'écoulement de l'air à la partie supérieure.

Nous avons cru devoir donner notre avis sur cette dernière question, malheureusement aucune expérience ne se trouve à l'appui de cette opinion. Elle est une conséquence des résultats trouvés au cours de notre étude et pourrait éventuellement être reprise et mise au point d'une façon précise.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Détermination expérimentale de mesure
des Coefficients aérodynamiques d'un corps quelconque
Similitude aérodynamique

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Ch. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Pour le recteur l'Inspecteur d'Académie.

B. MAURELET.

IMPRIMERIE DU PALAIS
20, RUE GEOFFROY-L'ASNIER, 20
~~~~~ PARIS (IV<sup>e</sup>)

---

---





